

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЛЬСОВОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫХ ТЕЛ

Ю.Н. Васьковський\*, докт.техн.наук, П.О. Райчев

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского»,  
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.

E-mail: [yun157@gmail.com](mailto:yun157@gmail.com), [krieg40000@gmail.com](mailto:krieg40000@gmail.com)

*Методами математического моделирования исследованы взаимосвязанные электромагнитные, механические и тепловые процессы в рельсовом ускорителе электропроводных тел. Разработана мультифизическая цепная математическая модель ускорителя. Предложено усовершенствование ускорителя традиционного исполнения – его многоступенчатая конструкция, позволяющая по сравнению с ускорителем традиционного исполнения существенно увеличить электромеханический КПД за счет снижения джоулевых потерь в рельсах. Это достигается за счет выключения из разрядного контура в процессе движения ускоряемого тела тех участков рельса, которые не задействованы в создании полезного магнитного потока и выполняют только функции токопровода. На примере ускорителя небольшого калибра показано существенное увеличение КПД и снижение нагрева элементов ускорителя. Библ. 7, табл. 3, рис. 9.*

**Ключевые слова:** рельсовый ускоритель, мультифизическая математическая модель.

**Введение.** В настоящее время в США, Китае, Франции, Японии, РФ продолжают развиваться разработки электромагнитного рельсового ускорителя (RailGun), работы над которым начались еще в 80-х годах XX века. Аналогичные разработки велись и в Украине, например [1, 2], но затем были приостановлены. Последние публикации в зарубежных изданиях [3–6] свидетельствуют о существенном продвижении в исследованиях и практической реализации тематики рельсового ускорителя (РУ).

РУ преобразует электрическую энергию емкостного накопителя (ЕН) в кинетическую энергию электропроводного тела. Классическая схема РУ показана на рис. 1, где обозначено: *a* – токоподводящие рельсы, *b* – ускоряемое тело (якорь), *c* – конструктивный корпус РУ, *d* – ЕН вместе с токоподводящими кабелями.

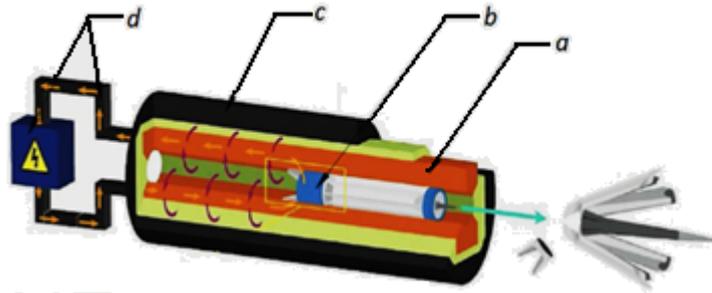


Рис. 1

В зависимости от параметров РУ и ЕН на выходе из РУ можно получить ли-

нейную скорость тела (1 ... 10) км/с и более. Электромеханическое преобразование энергии происходит в импульсном режиме при разряде ЕН на нелинейную активно-индуктивную нагрузку, которым является сам РУ. В общем виде конструктивно РУ состоит из неподвижных электропроводящих рельс и подвижного электропроводного тела (якоря), который расположен между рельсами и ускоряется вдоль длины рельс за счет импульсной электромагнитной силы, возникающей при разряде емкости на РУ. Получение умеренных скоростей якоря массой 50 ... 100 г не вызывает затруднений, но при скоростях, превышающих 1,5 км/с проблемы технической реализации РУ существенно усложняются, что связано с очень малой длительностью процесса электромагнитного ускорения (несколько миллисекунд) при одновременном увеличении его интенсивности. Среди наиболее существенных проблем РУ и ЕН можно отметить следующие.

1. Глубина проникновения импульсного электромагнитного поля в массивные электропроводные рельсы мала (миллиметры), что при значительных импульсах тока (мегаамперы) приводит к огромным плотностям тока, нагреву и электродинамическим усилиям, разрушающим рельсы и якорь. Физически процессы в подвижном электрическом контакте между рельсами и якорем вызывают оплавление, электроэрозию, необратимую деформацию активных материалов. При этом значи-

тельная часть энергии ЕН теряется на нагрев рельс и якоря и поэтому электромеханический КПД РУ, который определяется отношением кинетической энергии якоря на вылете из РУ к использованной электрической энергии ЕН, невелик – 10 ... 20%.

2. Величина запасаемой электроэнергии в ЕН и его габариты определяются требуемой кинетической энергией якоря. При этом для получения быстрого и интенсивного импульса тока начальное напряжение заряда ЕН должно быть высоким, а величину емкости ЕН необходимо согласовать со временем ускорения якоря. Важным параметром является мощность системы зарядки ЕН, влияющая на время зарядки ЕН для повторного срабатывания РУ, которое может составлять десятки минут.

РУ позволяет получить кинетические характеристики ускоряемого тела, которые не могут быть получены традиционными способами ускорения, например, с помощью пороховых зарядов. Поэтому дальнейшая разработка РУ остается актуальной задачей, причем ключевым вопросом является повышение КПД РУ для снижения массогабаритных и энергетических характеристик системы его электропитания. Решение технических проблем РУ существенно усложняется при росте его мощности, что объясняет отсутствие видимых успехов в практическом применении РУ. Разработка на принципе RailGun образцов РУ небольшого калибра (по массе якоря и его скорости), имеющих обоснованную сферу применения, представляется более достижимой. Такие мобильные РУ, устанавливаемые на наземных и воздушных транспортных средствах, могут эффективно решать поставленные задачи.

**Целью работы** является усовершенствование и оптимизация конструкции РУ для увеличения его КПД и снижения нагрева. Предлагаемые технические решения обосновываются методами математического моделирования.

**Математическая модель физических процессов РУ.** Математическая модель состоит из двух взаимосвязанных моделей: мультифизической цепной модели, которая выполнена в среде Matlab–Simulink [7], и полевой модели, выполненной в среде Comsol Multiphysics.

Мультифизическая цепная модель состоит из четырех взаимосвязанных подсистем (рис. 2). Основная задача модели – расчет электромагнитных, механических и тепловых процессов при ускорении якоря. Математическая модель описывается системой уравнений (1), дополненной системой начальных условий (2).

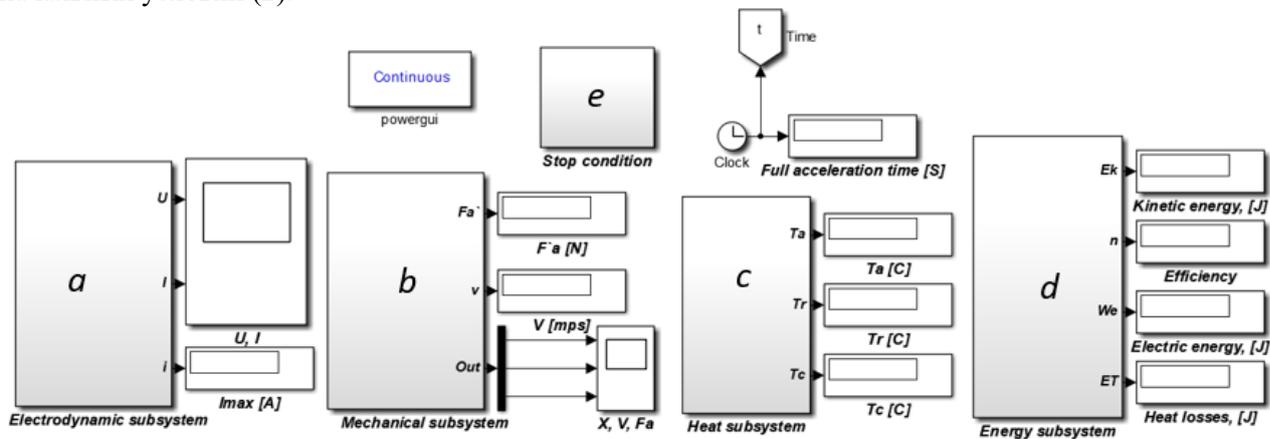


Рис. 2

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d^2 x}{dt^2} [L(x) + L_t] + i [R_r(x, T_r) + R_a(T_a) + R_z(T_c)] &= \frac{1}{c_p} \int_0^T i dt; \\ \frac{d^2 x}{dt^2} &= \frac{F^2}{2m_a} \frac{dx}{dt}; \\ R_r(x, T_r) \int_0^T i^2 dt &= C m_r T_r; \\ R_a(T_a) \int_0^T i^2 dt &= C m_a T_a; \\ R_c(T_c) \int_0^T i^2 dt &= 2 C m_c T_c; \\ \begin{cases} u_c(0) = U_{c0}, i(0) = 0; \\ x(0) = x_0, m_a = \text{const}; \\ T_c, T_a, T_r(0) = T_0; \end{cases} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} u_c(0) &= U_{c0}, i(0) = 0; \\ x(0) &= x_0, m_a = \text{const}; \\ T_c, T_a, T_r(0) &= T_0; \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где  $L(x)$  – переменная индуктивность РУ, зависящая от текущей координаты  $x$  мгновенного положения якоря;  $L_i$  – дополнительная индуктивность, реализованная в виде индуктора с пренебрежительно малым активным сопротивлением в цепи питания РУ, предназначенного для формирования разрядного импульса;  $R_m(x, T_m)$  – переменное активное сопротивление рельс РУ, зависящее от координаты  $x$  якоря и температуры рельс;  $R_a(T_a)$  – переменное активное сопротивление якоря;  $R_c(T_c)$  – переменное активное сопротивление кабеля;  $C_0$  – емкость ЕН;  $C$  – теплоемкость;  $m_a, m_r, m_c$  – массы ускоряемого тела, пары рельс и кабеля питания соответственно;  $T_r, T_a, T_c$  – мгновенные температуры рельс, якоря, и кабелей питания соответственно;  $U_{C0}$  – начальное напряжение ЕН;  $T_0$  – начальная температура. Искомыми временными функциями в системе (1) являются: ток разряда РУ  $i$ , координата якоря  $x$ , температуры элементов РУ. Зависимости активных сопротивлений элементов РУ от температуры имеет известный линейный характер

$$R = R_0(1 + \alpha(T - T_0)), \quad (3)$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления. При решении системы уравнений (1) для определения текущих значений сопротивлений, входящих в эту систему, использовалась температура, определенная на предыдущем временном шаге расчета.

На базе первого уравнения реализована электродинамическая подсистема (а) на рис. 2, описывающая переходный процесс разряда емкости на активно-индуктивную нагрузку с переменными параметрами  $L(x)$  и  $R(x, T)$ . Нагрузка состоит из четырех последовательных элементов: индуктора, пары кабелей питания, пары рельс и электропроводного якоря. При этом индуктивностями якоря и кабелей питания пренебрегаем ввиду их малых значений и незадействованности данных элементов в создании рабочего магнитного потока. Подсистема (а) взаимодействует с остальными подсистемами модели через обратные связи, когда входными величинами являются координата якоря и температуры элементов РУ, выходным – ток в цепи РУ.

Второе уравнение системы (1) описывает движение якоря под действием силы Ампера и положено в основу механической подсистемы (б), на вход которой подается ток, полученный из электродинамической подсистемы. Выходными параметрами являются скорость, координата якоря и значение силы Ампера. Моделирование механических процессов в ускорителе выполнено с помощью эквивалентной электродинамической схемы замещения [7]. Дополнительно присутствует блок расчета электромагнитной силы поперечного взаимодействия рельс.

Расчет температуры элементов РУ производится с помощью трех последних уравнений системы (1) в предположении адиабатического процесса нагревания. Модель создана на базе тепловых элементов Simulink и содержит три отдельных блока, каждый из которых предназначен для моделирования нагрева рельс, якоря и системы кабелей питания. Модель учитывает изменение во времени длины рельс (координаты  $x$ ) и активного сопротивления элементов РУ. На вход тепловой подсистемы (с) поступают значения тока и активных сопротивлений элементов РУ, производится расчет величины активных потерь на каждом участке и температуры нагрева каждого из них. Обратные связи из тепловой системы сообщают значения температур в электродинамическую подсистему (а).

Подсистема (д) выполняет расчет энергетического баланса ускорителя и дает оценку точности расчета по критерию сходимости энергетического баланса в соответствии с равенством

$$\Delta W_E = E_k + E_Q + W_m, \quad (4)$$

где  $\Delta W_E$  – затраченная электрическая энергия ЕН;  $E_k$  – кинетическая энергия якоря на выходе из РУ;  $E_Q$  – полная энергия тепловых потерь;  $W_m$  – остаточная энергия магнитного поля РУ.

Дополнительно в модели присутствует блок остановки расчета (е) по условию достижения якорем крайней точки рельс или достижения током нулевого значения.

Полевая модель РУ выполнена в среде Comsol Multiphysics и предназначена для определения погонного сопротивления и погонной индуктивности единицы длины рельс заданного сечения. Полученные результаты используются для подстановки в мультифизическую цепную модель и дальнейшего расчета параметров РУ во время процесса ускорения.

Модель состоит из пары рельс в поперечном сечении РУ. На внутренних, обращенных друг к другу сторонах рельс выделены скин-слои, толщины которых определены по формуле (5). Эта формула получена аппроксимацией известных расчетных данных зависимости толщины скин-слоя от частоты протекающего тока для материала меди, из которой выполнены рельсы. С учетом импульсного характера разрядного тока РУ его эквивалентная частота определена через длительность импульса, которая предполагается приближенно равной полупериоду колебаний

$$\delta = 2,09\sqrt{2T_i}, \quad (5)$$

где  $T_i$  – длительность импульса тока в миллисекундах,  $\delta$  – толщина скин-слоя в миллиметрах.

Описанный метод позволяет с достаточной точностью моделировать электромагнитные процессы в РУ и определять параметры, необходимые для их дальнейшего использования в мультифизической цепной модели.

**Усовершенствование конструкции РУ.** Низкое значение КПД РУ традиционного исполнения объясняется большими тепловыми потерями в активном сопротивлении рельс. Их величина обусловлена не только существенными плотностями тока в рельсах, но и использованием в качестве токопровода участков рельс, которые уже не задействованы в создании магнитного потока, непосредственно взаимодействующего с током якоря. На этих участках рельс, которые составляют около 90% расстояния между начальным и текущим положением якоря, бесполезно выделяется основная часть тепловых потерь. Ситуация усугубляется значительным увеличением активного сопротивления рельс вследствие их нагрева, и, прежде всего, сопротивления начальных участков рельс, находящихся под непрерывной токовой нагрузкой.

Предлагаемое решение этой проблемы состоит в использовании многоступенчатой конструкции РУ, питаемой от единого ЕН (рис. 3). В предлагаемой конструкции РУ рельсы по длине разделены на взаимоизолированные участки (ступени), которые присоединены параллельно к двум токоподводящим шинам, выполненным из многожильного кабеля с изолированными жилами. При движении якоря каждая пройденная ступень рельс выключается из разрядного контура, а последующая ступень включается в него. Переключение ступеней для протекания по ним разрядного тока происходит без дополнительных устройств управления – самим якорем, последовательно замыкающим ступени посредством подвижного электрического контакта (самокоммутация ступеней). По сравнению с массивными рельсами подводящий многожильный кабель меньше подвержен влиянию скин-эффекта, имеет на 1–2 порядка меньшее погонное сопротивление и представляет собой дополнительную тепловую массу, на которой рассеивается часть тепловых потерь, препятствуя возникновению локальных перегревов.

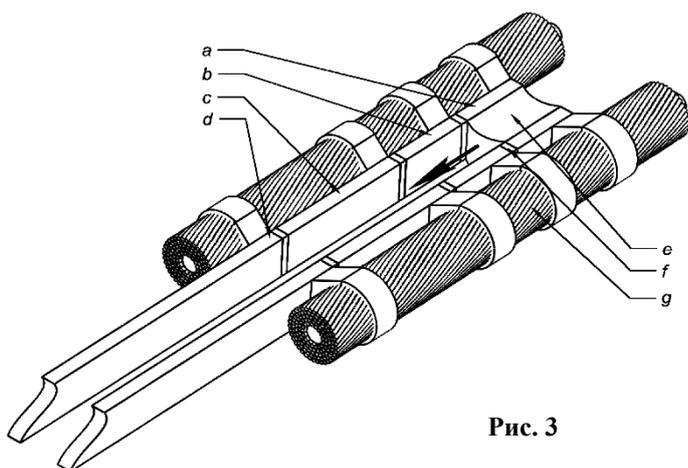


Рис. 3

На рис. 3 показан четырехступенчатый РУ, где обозначено:  $a, b, c, d$  – первая, вторая, третья и четвертая ступени РУ,  $e$  – якорь,  $f$  – изоляционная прокладка,  $g$  – многожильный кабель.

**Результаты моделирования РУ.** Далее приведены результаты сравнительного анализа традиционного одноступенчатого и ряда вариантов многоступенчатых РУ.

По результатам полевого моделирования для заданной длительности импульса тока были рассчитаны значения погонной индуктивности и погонного активного сопротивления рельс  $L_{xx} = 4,22 \cdot 10^{-7}$  Гн/м,  $R_{xx} = 9,26 \cdot 10^{-4}$  Ом/м, которые далее использованы в мультифизической цепной модели (1) – (5). Во всех рассмотренных вариантах РУ начальная энергия и начальное напряжение ЕН равнялись соответственно 52 кДж и 400 В, а емкость накопителя – 0,65 Ф. Расчетные результаты сведены в табл. 1. Моделирование проводилось при неизменной геометрии рельс, параметров ЕН и массе якоря 50 г.

На рис. 4 и рис. 5 показаны временные зависимости активного сопротивления рельс и тока РУ для традиционной одноступенчатой конструкции РУ (кривая  $a$ ) и предлагаемого шестиступенчатого РУ (кривая  $b$ ); на рис. 6 – временные зависимости температуры рельс для традиционного РУ ( $a$ ),

шестиступенчатого РУ (*b*) и кабелей питания (*b'*); на рис. 7 – временные зависимости скорости якоря для традиционного РУ (*a*), шестиступенчатого РУ (*b*) и временные зависимости текущей координаты якоря *x* для традиционного РУ (*a'*) и шестиступенчатого РУ (*b'*).

Таблица 1

Количество ступеней	1	2	4	6
Длительность импульса, мс	1,1	1,24	1,26	1,27
Скорость якоря, м/с	552	627	677	690
Максимальный ток, кА	540	541	542	550
Максимальная температура рельс, °С	1077	693	361	206
Полные тепловые потери, кДж	41,4	32,4	27,3	26
Кинетическая энергия якоря, кДж	7,6	9,8	11,5	12
КПД, %	15	19	22	23

Приведенные результаты свидетельствуют, что при выбранных параметрах РУ и ЕН характер разрядного тока РУ близок к полупериоду периодического разряда и стремится к нулю в момент вылета якоря из рельс РУ (рис. 5), что позволяет избежать появления дуги в момент

разрыва электрического контакта между рельсами и якорем. При этом при одинаковых амплитудах и достаточно близких по характеру разрядных токах в шестиступенчатой конструкции РУ нагрев участков рельс значительно уменьшился (рис. 6), а КПД РУ по сравнению с одноступенчатым вариантом увеличился с 15 до 23%, что свидетельствует о перспективности предлагаемого усовершенствованного РУ.

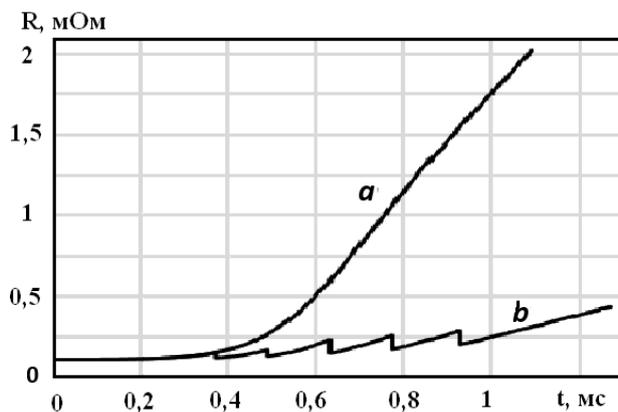


Рис. 4

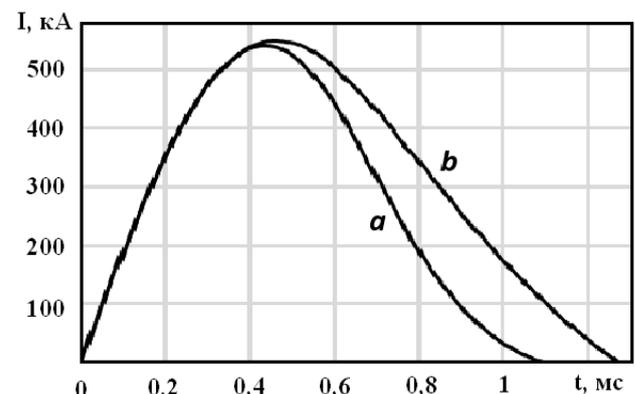


Рис. 5

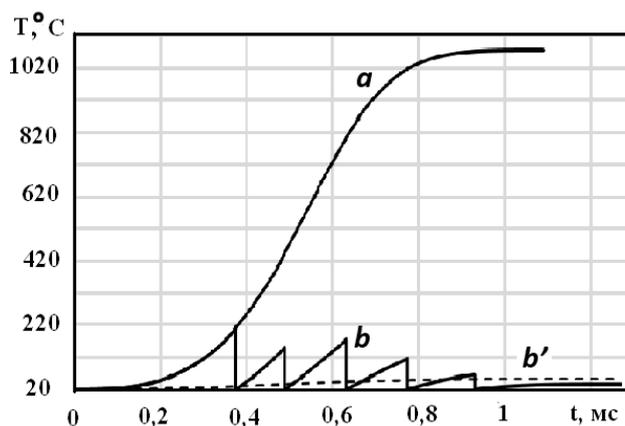


Рис. 6

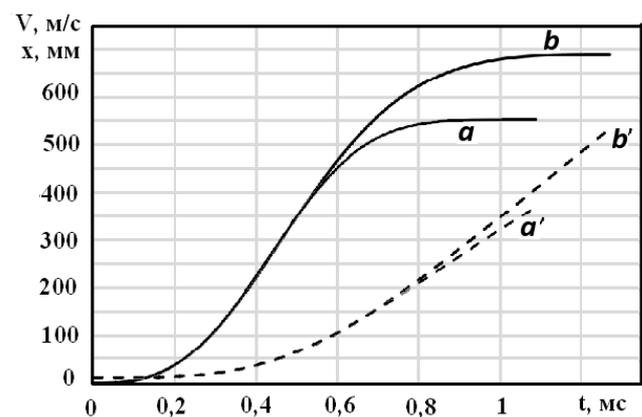


Рис. 7

Дальнейшая оптимизации параметров РУ направлена на увеличение КПД РУ за счет согласованного выбора емкости и напряжения ЕН, величины дополнительной индуктивности и массы якоря. Правильный выбор указанных параметров существенно влияет на эффективность РУ. Для оптимизации выбран шестиступенчатый РУ, как наиболее энергоэффективный и наименее подверженный негативному влиянию нагрева. На область поиска оптимальных значений указанных параметров накладывались следующие ограничения: максимальная температура рельс не должна превышать 500 °С; величина тока РУ в момент вылета якоря из рельс не должна превышать 1 кА. При этом начальная энергия ЕН принимается неизменной.

Оптимизация параметров РУ по критерию максимума КПД содержит два последовательных этапа: 1) выбор оптимальных параметров ЕН и индуктора; 2) выбор оптимальной массы якоря.

При оптимизации РУ учитывались зависимости значений погонных активного сопротивления и индуктивности рельс от толщины скин-слоя.

Значения параметров ЕН и дополнительного индуктора существенно влияют на длительность импульса тока, которая может изменяться в пределах 0,25...3 мс. Соответственно толщина скин-слоя при этом изменяется в пределах 1,5...5 мм. Для уточнения параметров мультифизической модели проведена серия расчетов по полевой модели РУ с различными толщинами скин-слоя, которые согласованы с длительностями импульса с учетом формулы (5). Зависимости погонной индуктивности рельс (а) и погонного активного сопротивления рельс (b) от длительности импульса показаны на рис. 8.

Поскольку необходимая длина рельс РУ должна быть согласована с длительностью импульса тока, то при различных параметрах ЕН и индуктора длина рельс может лежать в пределах 0,25...1,5 м. При этом возникает задача оптимального разбиения всей рельсы на участки шести ступеней. Оптимальный выбор длин ступеней выполнялся с учетом ускоренного характера движения якоря, фактической длительности импульса тока и отсутствия недопустимых тепловых потерь на каждой ступени.

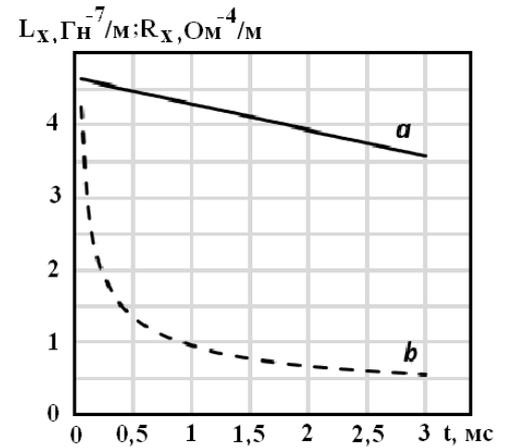


Рис. 8

Таблица 2

$L_i$ , мкГн	U, в	200	300	400	600	800
	C, Ф	2,6	1,15	0,65	0,29	0,16
0,025		27,0	—	—	—	—
0,05		30,1	34,5	33,6	—	—
0,1		29,3	31,3	29,5	23,5	17,0
0,2		26,0	25,6	23,0	16,5	11,3
0,4		20,1	18,8	15,5	10,4	6,5

функциональным ограничениям. При более высоких значениях напряжения ЕН и малых значениях емкости и дополнительной индуктивности происходит искажение формы импульса и повышение амплитуды тока, что приводит к неудовлетворительным температурным режимам. При более высоких значениях емкости и индуктивности разряд ЕН протекает более медленно, что является причиной увеличения потерь на активном сопротивлении рельс и, как результат, снижения КПД. Полученная точка максимума КПД, выделенная в табл. 2, соответствует варианту РУ с оптимальным соотношением параметров ЕН и индуктора, как с точки зрения формы, так и с точки зрения длительности импульса тока. При дальнейшем уменьшении величины добавочной индуктивности и неизменных параметрах ЕН происходит превышение допустимых температур рельс.

Расчетные значения КПД РУ при варьировании емкости и начального напряжения ЕН, а также дополнительной индуктивности приведены в табл. 2. Во всех вариантах РУ начальная энергия ЕН равна 52 кДж. Максимальному КПД, который составляет 34,5%, соответствуют следующие параметры РУ: напряжение ЕН – 300 В; ёмкость ЕН – 1,15 Ф; дополнительная индуктивность – 0,05 мкГн. Прочерками в табл. 2 обозначены варианты РУ, которые не удовлетворяют установленным выше

Таблица 3

Масса якоря, г	40	50	60	70
Использованная энергия ЕН, кДж	51	50,5	50	49,8
Скорость якоря, м/с	987	847	743	663
Длительность импульса, мс	1,5	1,39	1,34	1,27
Макс. температура рельс, °С	256	311	367	425
Полные тепловые потери, кДж	31	32	33,1	34,0
Кинетическая энергия якоря, кДж	19,5	17,9	16,6	15,4
КПД, %	37,5	34,5	31,9	29,6

Второй этап оптимизации состоит в определении оптимальной массы ускоряемого якоря. В табл. 3 приведены результаты моделирования РУ при варьировании массы якоря. При этом, использованы параметры ЕН и добавочной индуктивности, найденные в ходе предыдущего этапа оптимизации.

На рис. 9 показаны временные зависимости скорости при различных массах якоря:  $a$  – 40 г,  $b$  – 50 г,  $c$  – 60 г,  $d$  – 70 г.

В соответствии с результатами моделирования прослеживается тенденция к снижению КПД при увеличении массы якоря. Это связано с одновременным уменьшением начального ускорения якоря и увеличением длительности разряда ЕН, что приводит к повышению мощности тепловых

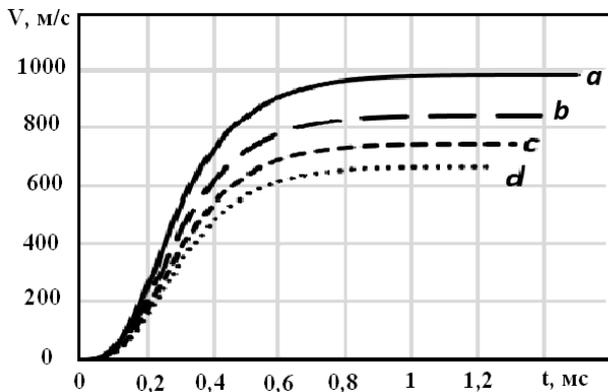


Рис. 9

потерь на начальном этапе ускорения. Ситуация усугубляется тем, что в связи с уменьшением начального ускорения тепловая энергия выделяется во все меньшей массе, вызывая существенное повышение температуры рельс (табл. 3) и соответственно температурно зависимое возрастание их активного сопротивления. Одновременно с этим снижается эффективность отдачи энергии ЕН. В этом случае проблему снижения КПД невозможно решить, варьируя только параметры ЕН и индуктора. Для повышения энергоэффективности РУ масса якоря должна быть уменьшена. Однако в случае, когда масса якоря оказывается чрезмерно малой – меньше 40 г, процесс разряда ЕН на РУ приобретает неудовлетворительный аperiодический характер. При этом величина разрядного тока в момент вылета якоря из РУ остается еще значительной и не удовлетворяет вышеуказанным ограничениям, что может вызвать возникновение дуги в момент вылета якоря из рельс РУ. С учетом ограничений, наложенных на область поиска, наивысший КПД – 37,5% достигается для РУ с указанными параметрами при оптимальной массе якоря 40 г. При этом максимально используется начальная накопленная энергия ЕН. Таким образом, очевидно, что выбор значений параметров РУ и ЕН существенно влияет на энергоэффективность функционирования РУ, при этом указанный алгоритм правильного согласованного их выбора должен в обязательном порядке выполняться при построении любых РУ с заданными техническими характеристиками.

**Выводы.** Разработана математическая модель РУ, состоящая из полевой и цепной мультифизической моделей. Модель учитывает взаимосвязанные электромагнитные, электромеханические и тепловые процессы в РУ и позволяет с достаточной точностью рассчитывать физические процессы в РУ небольшого калибра.

Предложено усовершенствование конструкции РУ, направленное на повышение его КПД и снижение нагрева элементов РУ. Суть усовершенствования состоит в использовании многоступенчатой конструкции рельс ускорителя. РУ запитывается от единого ЕН через многожильный кабель с низким удельным сопротивлением. При ускоренном движении якоря вдоль длины рельс якорь посредством подвижного электрического контакта последовательно комутует отдельные ступени рельс, отключая отработанные ступени, уже не задействованные в создании полезного магнитного потока, и подключая последующие ступени в направлении движения якоря. Применение этого усовершенствования при одновременной оптимизации параметров ЕН и массы якоря позволяют по сравнению с РУ традиционного исполнения увеличить КПД с 15 до 37,5% при существенном снижении нагрева рельс. Указанные технические решения могут быть применены в РУ больших калибров.

1. Васьковский Ю.Н., Кришук Н.Г., Бондарь Л.Н. Математическое моделирование электромагнитных полей и джоулевых потерь в рельсовом ускорителе. *Техн. электродинамика*. 1992. № 5. С. 3-11.
2. Chemerys V.T., Vaskovskyi Yu.M. Current distribution in the contact zone of railgun. 6th European symp. on *Electromag. Launch Technology*. Hague, Netherlands, 25-28 May, 1997. Pp. 343-352.
3. Zhenchun Wang, Huiguang Li, Yintang Wen, Zaiji Zhan, Xiaoting Peng, Wenkui Wang. Analysis of a series augmented railgun launching process. XIX International Conference on *Electrical Machines* ICEM, 2010. Rome. 2010. Pp. 1-4.
4. Longwen Jin, Bin Lei, Qian Zhang, Rengui Zhu. Electromechanical performance of rails with different cross-sectional shapes in railgun. *IEEE transactions on plasma science*. 2015. Vol. 43. No 5. Pp. 1220-1224.

5. [https://politexpert.net/85762-v-shest-raz-moshnee-relsotron-rf-vyshel-na-novyyuroven?utm\\_medium=referral&utm\\_source=lentainform&utm\\_campaign=politexpert.net&utm\\_term=1258352&utm\\_content=5956872](https://politexpert.net/85762-v-shest-raz-moshnee-relsotron-rf-vyshel-na-novyyuroven?utm_medium=referral&utm_source=lentainform&utm_campaign=politexpert.net&utm_term=1258352&utm_content=5956872)
6. <https://www.sciencedebate2008.com/railgun>.
7. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. Киев: Наш формат, 2015. 306 с.

УДК 621.313.323

## УДОСКОНАЛЕННЯ І ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЙКОВОГО ПРИСКОРЮВАЧА ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ ТІЛ

Ю.М. Васьковський, докт.техн.наук, П.О. Райчев

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

E-mail: [vun157@gmail.com](mailto:vun157@gmail.com), [krieg40000@gmail.com](mailto:krieg40000@gmail.com)

*Метади математичного моделювання досліджено взаємопов'язані електромагнітні, механічні та теплові процеси в рейковому прискорювачі електропровідних тіл. Розроблено мультифізичну ланцюгову математичну модель прискорювача. Запропоновано удосконалення прискорювача традиційного виконання – його багатоступенева конструкція, що порівняно з прискорювачем традиційного виконання, дає змогу суттєво підвищити електромеханічний ККД за рахунок зниження джоулевих втрат у рейках. Це досягається за рахунок виключення з розрядного контура в процесі руху прискорюваного тіла тих ділянок рейок, що не задіяні в створенні корисного магнітного потоку і виконують виключно функції струмопроводу. На прикладі прискорювача невеликого калібру показано суттєве підвищення ККД і зменшення нагріву елементів прискорювача.*

Бібл. 7, табл. 3, рис. 9.

**Ключові слова:** рейковий прискорювач, мультифізична математична модель.

## IMPROVEMENT AND OPTIMISATION OF A RAIL ACCELERATOR OF CONDUCTIVE BODIES

Ju.M. Vaskovskiy, P.O. Raichev

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",

pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

E-mail: [vun157@gmail.com](mailto:vun157@gmail.com), [krieg40000@gmail.com](mailto:krieg40000@gmail.com)

*In the article, methods of mathematical modelling are used to study interrelated electromagnetic, mechanical, and heat processes in a rail accelerator of conductive bodies. The multiphysical chain mathematical model of an accelerator has been created. The way of improvement of traditional accelerator was proposed, which is the multistage construction that allows to increase substantially the electromechanical efficiency by reducing Joule losses in the rails. This is achieved by detachment from discharge circuit of those rails sections that are not involved in effective magnetic flux creation and perform the functions of current conductors only. In the example of small-caliber accelerator, the substantial efficiency rise and accelerator components heating reduction is demonstrated. References 7, tables 3, figures 9.*

**Keywords:** rail accelerator, multiphysical mathematical model.

1. Vaskovsky Yu.N., Krishuk N.G., Bondar L.N. Mathematical Modeling of Electromagnetic Fields and Joule Losses in a Rail-Gun. *Tekhnicheskaya Elektrodinamika*. 1992. No 5. Pp. 3-11. (Rus)
2. Chemerys V.T., Vaskovskiy Yu.M. Current distribution in the contact zone of railgun. 6th European symp. on *Electromag. Launch Technology*. Hague, Netherlands, 25-28 May, 1997. Pp. 343-352.
3. Zhenchun Wang, Huiguang Li, Yintang Wen, Zaiji Zhan, Xiaoting Peng, Wenkui Wang. Analysis of a series augmented railgun launching process. XIX International Conference on *Electrical Machines ICEM 2010*. Rome. 2010. Pp. 1-4.
4. Longwen Jin, Bin Lei, Qian Zhang, Rengui Zhu. Electromechanical performance of rails with different cross-sectional shapes in railgun. *IEEE transactions on plasma science*. 2015. Vol. 43. No 5. Pp. 1220-1224.
5. [https://politexpert.net/85762-v-shest-raz-moshnee-relsotron-rf-vyshel-na-novyyuroven?utm\\_medium=referral&utm\\_source=lentainform&utm\\_campaign=politexpert.net&utm\\_term=1258352&utm\\_content=5956872](https://politexpert.net/85762-v-shest-raz-moshnee-relsotron-rf-vyshel-na-novyyuroven?utm_medium=referral&utm_source=lentainform&utm_campaign=politexpert.net&utm_term=1258352&utm_content=5956872)
6. <https://www.sciencedebate2008.com/railgun>
7. Podoltsev A.D., Kucheriava I.N. Multiphysical modeling in electrical engineering. Kyiv: Nash format, 2015. 306 p. (Rus)

Надійшла 19.07.2018  
Остаточний варіант 11.09.2018