

УДК 533.95:533.8

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ТОКА ДЛЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

А. П. Глинов, А. Е. Полтанов, В. Н. Рындин, Г. И. Симонова

Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований,
142190 Троицк Московской области
E-mail: ledapg@triniti.ru

Разработана методика аналитических оценок режимов функционирования линейных электрических генераторов (ЛЭГ) рельсотронного типа при выводе тока на индуктивно-активную нагрузку. Анализ полученных решений показал, что эффективность применения генераторов данного типа для запитки геофизических диполей в электроразведке невысока (КПД не превышает 20 %). Большую эффективность обеспечивают индукционные ЛЭГ катушечного типа. Проведено численное моделирование режимов одной из конструкций такого генератора. Предложены и исследованы варианты схем ЛЭГ с нелинейной индуктивностью, создающие квазипрямоугольные импульсы тока в нагрузке и представляющие интерес при решении задач электроразведки.

Ключевые слова: линейные электрические генераторы, геофизические исследования, электроразведка, численное моделирование.

Введение. Импульсные линейные электрические генераторы (ЛЭГ), преобразующие кинетическую энергию поступательно движущихся тел в электрическую, имеют существенно меньшее время выхода на рабочий режим (в пределах нескольких миллисекунд) и более простую и дешевую конструкцию по сравнению с машинными ударными компрессионными генераторами. Удельная энергоёмкость ЛЭГ может быть доведена до значений $1,5 \div 2,0$ Дж/г. Коэффициент преобразования энергии достигает 40–50 %, причем эффективность преобразования возрастает с увеличением калибра ствола генератора. Такие электрогенераторы, позволяющие обеспечить за несколько миллисекунд вывод в нагрузку энергии до 1 МДж, могут быть использованы в качестве автономных импульсных источников энергии для питания геофизических диполей либо в качестве источника энергии для электромагнитных пушек. В [1] представлены некоторые идеи конструирования таких систем и методы их анализа, в частности с учетом процессов в камере сгорания рабочего топлива.

В данной работе основное внимание уделяется анализу общих электрофизических закономерностей функционирования ЛЭГ, в первую очередь, применительно к геофизическим задачам. Проводится анализ режимов ЛЭГ на основе торможения предварительно ускоренного якоря магнитным полем в канале обращенного многовиткового рельсотрона. При этом рассматривается достаточно широкий диапазон параметров полезной электрической нагрузки, включающий также параметры типичных геофизических диполей. Строится методика приближенных аналитических оценок характеристик ЛЭГ. Предлагаются рекомендации по выбору конструкции ЛЭГ для геофизических диполей. Отмечается целесообразность использования для данных целей катушечных ЛЭГ индукционного типа. Изучаются режимы работы специальной конструкции ЛЭГ индукционного типа, обеспе-

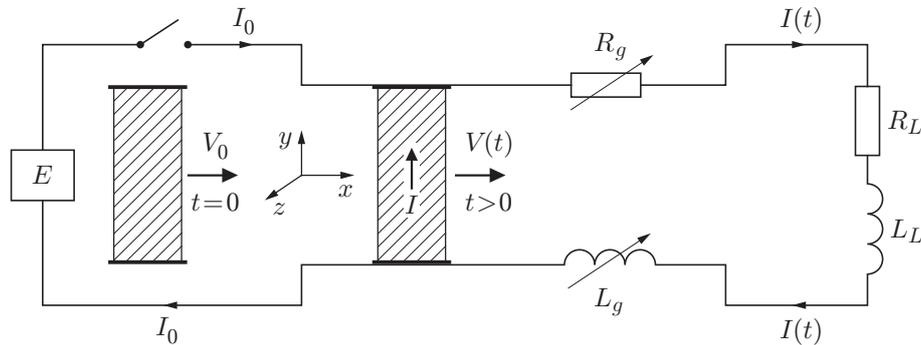


Рис. 1. Схема генератора на основе обращенного рельсотрона

чивающей в геофизическом диполе необходимый импульс тока до 50 кА при длительности импульса 2–3 мс и напряжении до 25 кВ. Проводится анализ схем ЛЭГ с нелинейной индуктивностью, способных обеспечить квазипрямоугольные импульсы тока в нагрузке, что также представляет интерес при проведении электроразведочных работ. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и проектировании мобильных систем электропитания различного целевого назначения на основе ЛЭГ.

1. Анализ упрощенных моделей ЛЭГ. Идея создания ЛЭГ, основанных на торможении в магнитном поле предварительно разогнанного якоря, впервые предложена в [2]. В работах [3–5] развита качественная теория ЛЭГ, позволяющая делать прогнозные оценки функционирования электрогенераторов рельсотронного типа.

Ниже проводится анализ полученных в [3, 4] теоретических результатов и дается их обобщение на случай высокоомных нагрузок. Электротехническая схема генератора тока представлена на рис. 1. Если электрическое сопротивление нагрузки R_L существенно превышает сопротивление шин R_g в канале торможения якоря, то суммарное сопротивление $R \approx R_L$ можно считать константой. Тогда нагрев шин практически не влияет на возбуждение тока в нагрузке. При этом модель ЛЭГ [3, 4] существенно упрощается:

$$\begin{aligned} \frac{d\xi}{d\tau} &= v, & \frac{dv}{d\tau} &= -\frac{\beta i^2}{2}, & \frac{d\lambda i}{d\tau} &= -\alpha i, \\ \tau = 0: & \quad \xi = 0, & v &= 1, & i &= 1. \end{aligned} \quad (1.1)$$

Здесь $\lambda = 1 + \gamma - \xi$ — вспомогательный параметр (обезразмеренная полная индуктивность генератора и нагрузки); $\gamma = L_L/L_g$; $L_g = L'l$; L' — погонная индуктивность шин; L_L , L_g — индуктивности нагрузки и генератора; l — длина генератора; $\alpha = Rl/(L_g V_0)$; V_0 — стартовая скорость якоря; $\beta = (1 + k_f)L_g I_0^2/(mV_0^2)$; I_0 — начальный ток в цепи; m — масса якоря; k_f — коэффициент сопротивления движению якоря стенок и шин ЛЭГ; $\xi = x/l$; x — продольная координата якоря; $v = V/V_0$; V — скорость якоря; $i = I/I_0$; I — ток в нагрузке; $\tau = V_0 t/l$; t — время.

Согласно данным [3, 4] для практики представляет интерес область параметров

$$\gamma \ll 1, \quad 0 \leq \alpha < 1, \quad \beta \leq \beta_* = \gamma/(\gamma + 1). \quad (1.2)$$

Здесь первое условие означает существенное превышение индуктивности генератора над индуктивностью нагрузки, что обеспечивает существенное усиление тока на величину порядка $1/\gamma$. Второе условие гарантирует монотонное нарастание тока в нагрузке с течением времени при движении якоря в канале генератора. Третье соотношение исключает остановку якоря и его возвратное движение в отсутствие активных омических нагрузок ($\alpha = 0$). При $\alpha \neq 0$ джоулева диссипация энергии в нагрузке приводит к уменьшению тока,

а следовательно, и силы торможения якоря. В результате предельно допустимое значение параметра β_* увеличивается с ростом показателя резистивности контура α .

Физический смысл введенных выше определяющих безразмерных параметров следующий. Величина α равна отношению электрического сопротивления нагрузки R к сопротивлению шин $L'V_0$, обусловленному движением якоря со скоростью V_0 . Параметр β есть отношение суммы магнитной энергии в шинах генератора с током, равным току возбуждения ($I = I_0$), и работы силы сопротивления движению якоря со скоростью V_0 к кинетической энергии якоря. Переменная γ представляет собой отношение индуктивностей нагрузки и шин генератора. В выбранных безразмерных переменных величина i есть коэффициент усиления тока. Система (1.1) исследуется в интервале от $\xi = 0$ до $\xi = 1$ (момент вылета) либо до $\xi = \xi_{\max}$, $V(\xi_{\max}) = 0$ (остановка якоря).

Для анализа результатов целесообразно ввести коэффициент K усиления электромагнитной энергии в нагрузке по отношению к начальной энергии в ней:

$$K = i^2 + 2\frac{\alpha}{\gamma} \int_0^{\tau} i^2(\tau) d\tau.$$

Мерой эффективности процесса генерации служит КПД η , равный отношению энергии в нагрузке к полной начальной энергии:

$$\eta = \frac{K\beta\gamma}{(1 + \gamma)\beta + (1 + k_f)}.$$

Если в качестве масштаба мощности использовать величину $N_* = (L_L I_0^2 / 2) / (l / V_0)$, то для обезразмеренной величины мощности получим

$$N = \frac{dK}{d\tau} = 2i^2 \left(\frac{\alpha}{\gamma} + \frac{v - \alpha}{\lambda} \right).$$

Средняя за время генерации мощность, отнесенная к величине N_* , составляет

$$\langle N \rangle = \frac{1}{\tau_{\max}} \int_0^{\tau_{\max}} N(\tau) d\tau.$$

Здесь τ_{\max} определяется условием $\xi(\tau_{\max}) = 1$ либо $\xi(\tau_{\max}) = \xi_{\max}$, что соответствует моменту вылета якоря либо его остановке.

Можно показать, что задача Коши (1.1) может быть сведена к одному нелинейному интегральному уравнению Вольтерры относительно тока либо скорости. Это уравнение можно представить в виде системы двух интегральных уравнений с переменным верхним пределом относительно двух переменных (скорости и тока):

$$v^2(\xi) = 1 - \beta \int_0^{\xi} i^2(p) dp, \tag{1.3}$$

$$i^2(\xi) = \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma + 1 - \xi} \right)^2 \exp \left(-2\alpha \int_0^{\xi} \frac{ds}{v(s)(\gamma + 1 - s)} \right).$$

Согласно (1.2) имеет смысл исследовать (1.3) при малых значениях параметра β . При этом нулевому приближению соответствует индекс 0, а первому — 1. Тогда при $\alpha \neq 1/2$ получим

$$v_0^2(\xi) = 1, \quad i_0^2(\xi) = \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma + 1 - \xi} \right)^{2(1-\alpha)}; \tag{1.4}$$

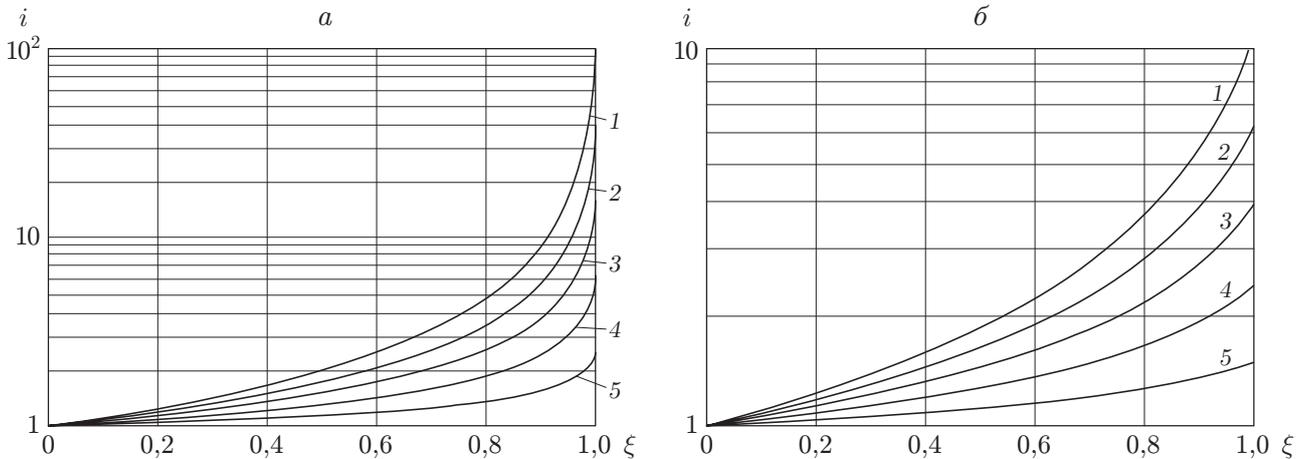


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления тока от продольной координаты якоря: *a* — $\beta = \gamma = 0,01$; *б* — $\beta = \gamma = 0,1$; 1 — $\alpha = 0$; 2 — $\alpha = 0,2$; 3 — $\alpha = 0,4$; 4 — $\alpha = 0,6$; 5 — $\alpha = 0,8$

$$i_*^2(\xi) = \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma + 1 - \xi} \right)^\mu, \quad \mu = 2 \left[1 - \alpha \left(1 + \frac{\beta(\gamma + 1)}{2(2\alpha - 1)} \right) \right],$$

$$v_1^2(\xi) = 1 + \beta \frac{(\gamma + 1)^{2(1-\alpha)}}{2\alpha - 1} [(\gamma + 1 - \xi)^{2\alpha-1} - (\gamma + 1)^{2\alpha-1}], \quad (1.5)$$

$$i_1^2 = i_*^2 \left(1 + \frac{\beta(\gamma + 1)}{2(2\alpha - 1)} \right) \left(1 + \frac{\alpha}{2\alpha - 1} (1 - v_1^2) \right).$$

При $\alpha = 1/2$ решение также получить несложно, но оно будет более громоздким, поэтому здесь не приводится. Нулевое приближение обеспечивает точность до 96 %. Следующее приближение (первое) дает относительную погрешность не более 0,6 %. Это справедливо для широкой области изменения сопротивления нагрузки и условий возбуждения тока.

Усиление тока в нагрузке для ряда значений сопротивления показано на рис. 2. Из (1.4) и рис. 2 следует, что увеличение тока экспоненциально зависит от сопротивления нагрузки (параметра резистивности α). Так, согласно [3] при $\alpha = 0$ максимальное увеличение тока равно $(\gamma + 1)/\gamma$, а при $\alpha \neq 0$ — $[(\gamma + 1)/\gamma]^{1-\alpha}$. На рис. 2 видно, что при движении якоря в канале рельсотрона происходит монотонное нарастание тока, причем скорость нарастания также увеличивается.

На рис. 3 представлена зависимость коэффициента усиления энергии в нагрузке K от продольной координаты якоря. Видно, что на начальных участках генерации тока (торможения якоря) резистивность нагрузки способствует увеличению выделения и накопления энергии. При движении якоря к краю генератора ($\xi = 1$) резистивность нагрузки приводит к резкому уменьшению полезной энергии в ней.

Зависимость КПД η от продольной координаты якоря приведена на рис. 4. Видно, что с увеличением резистивности нагрузки (параметра α) КПД уменьшается. Объясняется это тем, что скорость якоря не успевает уменьшиться до необходимой величины из-за ограничения тока.

Зависимость мощности генератора N от продольной координаты и параметра резистивности представлена на рис. 5. Величина N отнесена к величине $N_* = (L_L I_0^2 / 2) / (l / V_0)$. При отсутствии омической нагрузки спад мощности по мере приближения якоря к выходу канала обусловлен его торможением и остановкой, поскольку нарушено третье условие устойчивой генерации тока в (1.2).

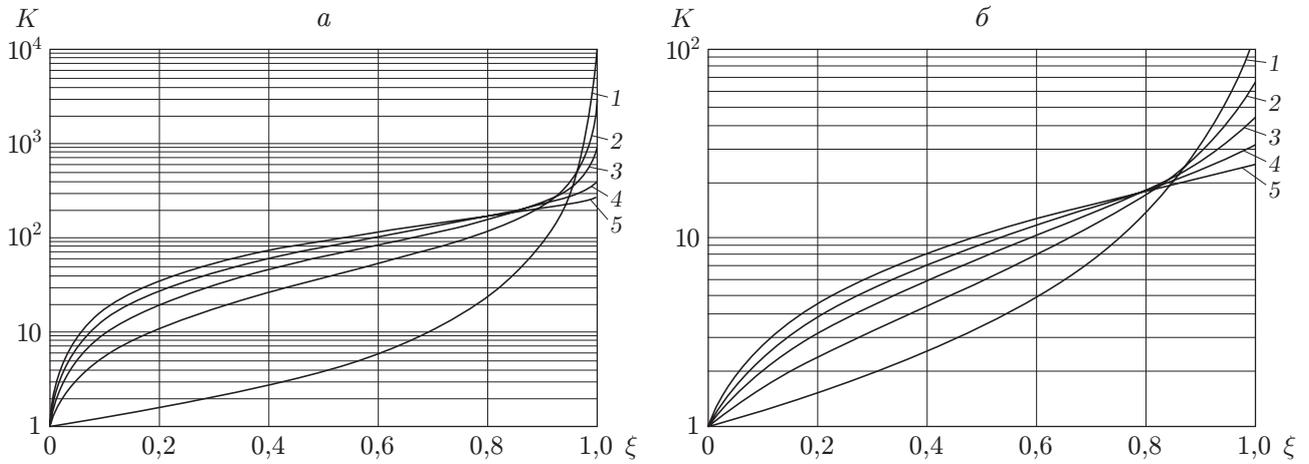


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления энергии в нагрузке от продольной координаты якоря (обозначения те же, что на рис. 2)

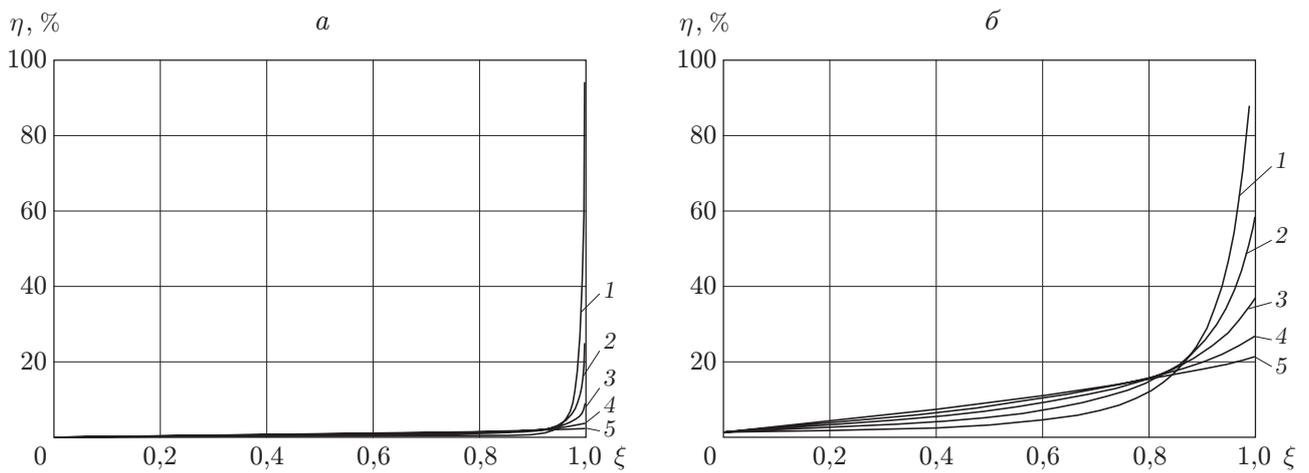


Рис. 4. Зависимость КПД от продольной координаты якоря (обозначения те же, что на рис. 2)

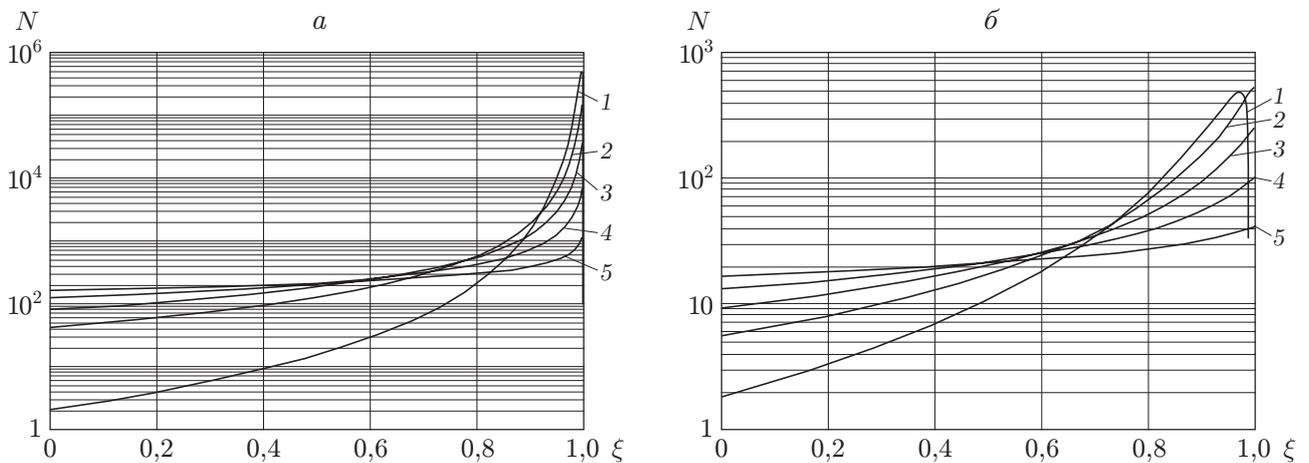


Рис. 5. Зависимость мощности генератора от продольной координаты якоря (обозначения те же, что на рис. 2)

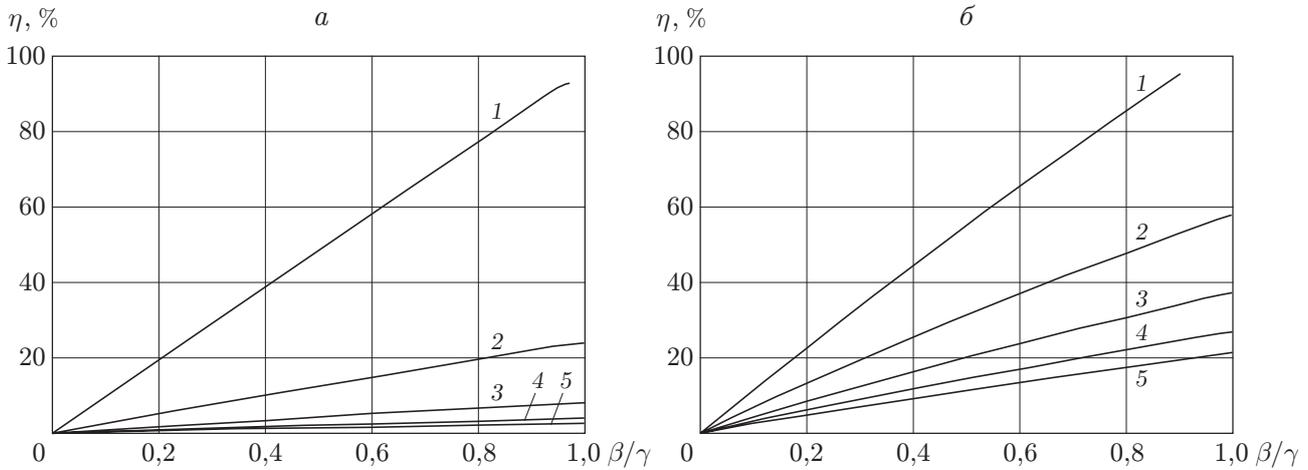


Рис. 6. Зависимость КПД от отношения β/γ в момент вылета или остановки якоря ($\xi = \xi_{\max}$):
 а — $\gamma = 0,01$; б — $\gamma = 0,1$; 1 — $\alpha = 0$; 2 — $\alpha = 0,2$; 3 — $\alpha = 0,4$; 4 — $\alpha = 0,6$; 5 — $\alpha = 0,8$

Результаты проведенных расчетов показывают, что при малых значениях параметра β такие характеристики, как мощность, коэффициенты усиления тока и энергии, слабо зависят от него. В частности, их отклонение от средних значений не превышает 7 % при изменении определяющих параметров ЛЭГ в широком диапазоне: $0 < \alpha < 0,8$; $0 < \beta/\gamma < 1$. Иной вид имеет зависимость КПД η от отношения β/γ в момент вылета или остановки якоря (рис. 6). С ростом β КПД увеличивается, что способствует более полному отбору кинетической энергии от якоря.

Проведенный выше анализ работы ЛЭГ в широком диапазоне определяющих параметров позволяет качественно оценивать его характеристики при выводе тока на различные индуктивно-омические нагрузки. В качестве примера можно рассмотреть геофизическую петлю [5] с параметрами $L_L = 0,273$ мкГн, $R_L = 0,66$ мОм. Тогда, полагая $L' = 5$ мкГн/м, $V_0 = 800$ м/с, $l = 1$ м, получим $\alpha \approx 0,2$; $\gamma \approx 0,05$, при этом необходим учет резистивности типичной геофизической нагрузки. Параметр β не должен превышать значение γ . Это позволяет найти верхнюю допустимую границу для тока возбуждения I_0 , если дополнительно задать массу якоря.

Для того чтобы получить результат при данных, отличных от рассмотренных, необходимо решать достаточно сложную систему уравнений (1.1). Можно использовать аналитическое решение (1.4), (1.5).

В качестве другого примера рассмотрим вывод тока на геофизический диполь [6] с параметрами $R_L = 10$ мОм, $L_L = 300$ мкГн. В этом случае $\alpha \approx 2,5$, т. е. нарушается условие генерации тока $\alpha < 1$. Дальнейшее увеличение начальной скорости якоря затруднительно, поэтому для уменьшения параметра α следует увеличивать погонную индуктивность. В многовитковых рельсовых системах ее значение может быть увеличено до 20 мкГн/м [7]. В этом случае $\alpha = 0,6$. Тогда максимальное значение КПД $\eta = 10 \div 25$ % (см. рис. 6). Реальный КПД будет еще меньше, так как в проведенных расчетах пренебрегалось внутренним сопротивлением источника тока. Таким образом, для вывода тока на высокоиндуктивные геофизические диполи, по-видимому, предпочтительны ЛЭГ не рельсотронного, а индукционного (катушечного) типа.

Ниже проводится анализ режимов некоторых вариантов ЛЭГ катушечного типа, в том числе при работе на геофизическую нагрузку.

2. Источник питания геофизического диполя. К источнику питания геофизического диполя предъявляются требования, обусловленные характером нагрузки. В данном случае источник питания предназначен для питания геофизического диполя с индуктивностью $L_d = 300$ мкГн и активным сопротивлением $R_d = 10$ мОм [6]. Максимальный ток запитки $I_d = 50$ кА. При этом накладывается ограничение по электрической прочности изоляции $E_{\max} = 30$ кВ.

Для питания геофизического диполя предлагается использовать линейный электрический генератор катушечного типа. Известные ЛЭГ содержат катушку статора и индуктивно связанную с ней катушку якоря, установленную с возможностью движения внутри или снаружи катушки статора под воздействием ускорителя [2]. Такой генератор имеет ряд недостатков, ограничивающих его применение в качестве источника питания геофизического диполя. Одним из основных недостатков является необходимость изготовления катушек статора и якоря с большими значениями собственных индуктивностей при большом значении коэффициента связи между ними (вследствие высокой индуктивности нагрузки). Это приводит к необходимости создания массивного якоря, а следовательно, к снижению эффективности преобразования кинетической энергии якоря. Кроме того, генерирование энергии в таком ЛЭГ происходит при движении якоря до тех пор, пока его положение не окажется согласованным с положением статора (при котором середины обмоток совпадают), а при дальнейшем движении происходит преобразование энергии магнитного поля в кинетическую энергию якоря (якорь ускоряется). При высокой скорости движение якоря по короткому полезному пути сопровождается генерацией повышенного напряжения на элементах ЛЭГ. Недостатки ЛЭГ катушечного типа можно уменьшить секционированием катушки статора и вводом в схему генератора диодных ключей.

Исследуемый модельный ЛЭГ (рис. 7) содержит n секций статора ($L_{c1} - L_{cn}$), соединенных последовательно и установленных вдоль оси движения якоря, образуя единый канал. В расчетах принято $n = 4$.

Якорь, содержащий обмотку L_1 , длина которой равна длине одной секции статора, установлен с возможностью осевого перемещения в канале обмотки статора. В исходном положении обмотка якоря подключена к источнику ЭДС начального возбуждения. Выводы секций обмотки статора подключены к общему проводу через обратные вентили $V_{D2} - V_{D6}$. Геофизическая нагрузка (L_L, R_L) включена между вторым выводом последней секции обмотки статора и общим проводом. Обратный вентиль V_{D1} шунтирует также обмотку якоря L_1 .

Рассматриваемый электрогенератор работает следующим образом. От источника ЭДС начального возбуждения посредством разъема X запитывается обмотка якоря L_1 . После достижения необходимой величины тока возбуждения якорь под воздействием уско-

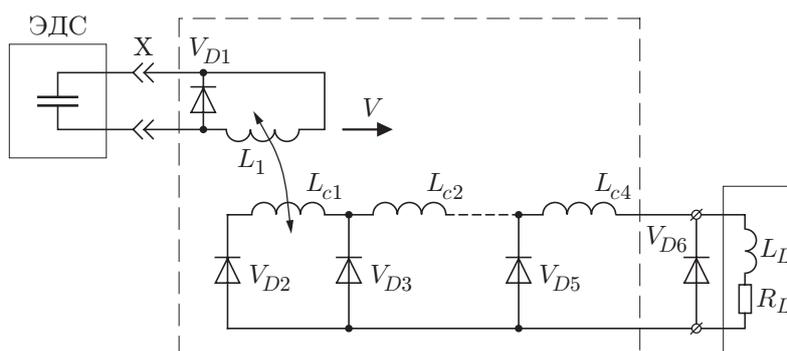


Рис. 7. Схема модельного генератора с секционированным катушечным якорем

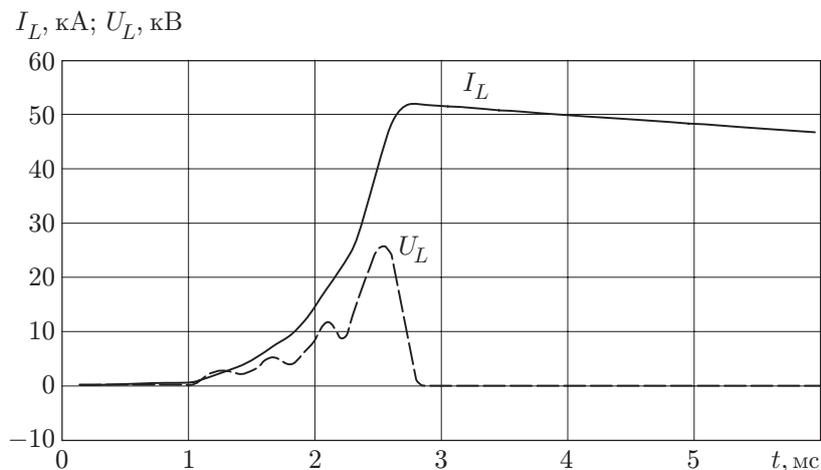


Рис. 8. Зависимости напряжения U_L и тока I_L в нагрузке от времени

рителя (на схеме не показан) движется по каналу вдоль оси секций обмотки статора. После отсоединения обмотки якоря от источника ЭДС начального возбуждения ее ток замыкается через обратный вентиль V_{D1} . При движении якоря поочередно в каждой секции обмотки статора наводится ЭДС, и по цепи последовательно соединенных секций обмоток статора и нагрузки протекает электрический ток.

В момент прохождения согласованного положения обмотки якоря и секции обмотки статора ЭДС на зажимах этой секции меняет знак, ток уменьшается до нуля, а магнитное поле якоря возбуждает ЭДС в очередной секции. При этом ток очередной секции замыкается через обратный вентиль, подключенный к ее первому зажиму. Предыдущая (пройденная) секция исключается из дальнейшей работы. За счет этого прекращаются потери энергии в пройденной секции, что приводит к увеличению КПД генератора. По мере движения якоря вдоль секций статора каждая из них поочередно “накачивает” энергией последующие секции и нагрузку практически по всей длине статора. При этом обеспечивается снижение максимального напряжения на нагрузке и обмотках генератора. Короткий, достаточно легкий якорь позволяет в несколько раз уменьшить кинетическую энергию, сообщаемую ему от ускорителя. В момент прохождения якорем согласованного положения с последней секцией статора ток нагрузки замыкается через последний обратный диод V_{D6} , а ток статора генератора уменьшается до нуля.

Результаты расчета процесса запитки геофизического диполя ($L_L = 300$ мкГн, $R_L = 10$ мОм) с помощью 4-секционного катушечного ЛЭГ приведены на рис. 8. При этом предполагалось, что проводники катушек представляют собой медные шины размером 5×2 мм (намотка на ребро). Физико-технические и геометрические параметры генератора следующие: собственная индуктивность секции статора $0,608$ мГн, собственная индуктивность якоря $0,565$ мГн, активное сопротивление секции статора $0,0706$ Ом, активное сопротивление якоря $0,0673$ Ом, емкость источника начального возбуждения 2 мФ, напряжение заряда емкости начального возбуждения 9 кВ, средний диаметр статора 257 мм, длина статора 600 мм, масса статора 150 кг, длина якоря 150 мм, масса якоря 20 кг, длина секции 150 мм, число витков статора 50 , средний диаметр якоря 245 мм, число витков якоря 50 , начальная скорость якоря 400 м/с.

Расчеты показали, что секционирование статора позволяет существенно (в 3–4 раза) увеличить коэффициент усиления тока. Данный вариант ЛЭГ обеспечивает запитку диполя током свыше 50 кА за время порядка 2 мс. Напряжение в процессе запитки не превышает 25 кВ.

3. Моделирование режимов ЛЭГ с нелинейной погонной индуктивностью.

В ЛЭГ с постоянным значением погонной индуктивности основная доля генерируемой энергии приходится на конечный участок движения якоря, поэтому импульс тока в нагрузке получается достаточно коротким и остроконечным [3, 4]. Специфическая форма выходного импульса ограничивает область применимости генератора.

Если конструкцию ЛЭГ модернизировать, обеспечив возможность уменьшения погонной индуктивности по мере движения якоря, то в нагрузке можно получить квазипрямоугольную форму импульса тока [3, 4, 8]. Методика расчета такого генератора основана на математическом моделировании с использованием пакета программ PSPICE. По результатам численного эксперимента могут быть выбраны и оптимизированы все учтенные в модели параметры, необходимые для конструирования ЛЭГ. Расчетная схема может быть представлена в виде электрической схемы или ее описания в текстовом файле с использованием встроенных моделей электрических элементов. Нелинейные электроэлементы моделируются с помощью управляемых источников напряжения и тока, а неэлектрические параметры задаются в виде математических выражений с использованием встроенных математических функций. Модель может быть модифицирована при изменении постановки задачи.

На рис. 9 приведены формы импульса тока при запитке активно-индуктивной нагрузки с помощью электрических генераторов с линейной (ЛЭГ) и нелинейной (модернизированный генератор) погонной индуктивностью. Кривая 1 соответствует форме импульса тока нагрузки при запитке от генератора с линейной индуктивностью 160 мкГн/м на длине 0,45 м, кривая 2 — форме импульса тока нагрузки при использовании модернизированного генератора с нелинейной индуктивностью (на длине 2,5 м происходит спад L' от 160 до 12 мкГн/м по линейному закону). Видно, что модернизированный генератор способен обеспечить почти плоскую вершину импульса тока.

Следует отметить, что в эксперименте предусматривалось специальное бандажирование катушек якоря и статора. Для импульсно-периодических режимов с многократными запусками генератора, возможно, потребуется дополнительная разработка системы охлаждения установки. В частности, оценки показывают, что удельный интеграл действия тока в витках катушек не превышает 25 % критического значения, соответствующего началу плавления шин. Наибольшим силовым нагрузкам подвержена зона контактного взаимодействия якоря и катушек статора, где магнитное поле максимальное. При этом упругие напряжения в катушках не превышают 2,5 % предела прочности.

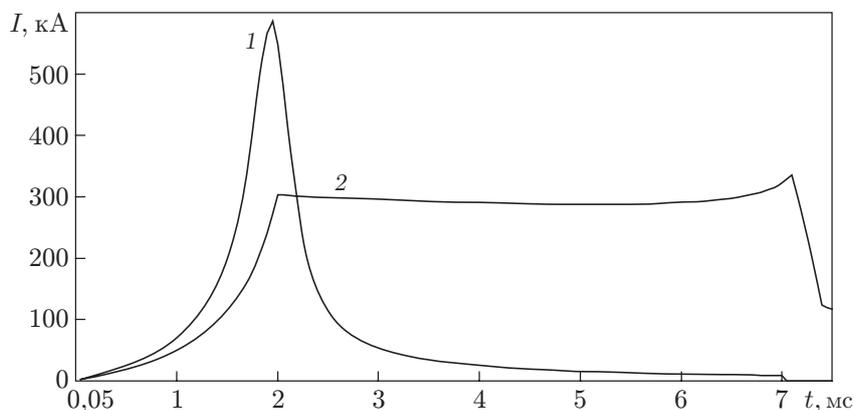


Рис. 9. Ток в нагрузке при различных законах изменения погонной индуктивности L' :
1 — $L' = \text{const}$; 2 — $L' = f(x)$

Заключение. Проведенное теоретическое исследование работы линейных баллистических генераторов при выводе тока на различные нагрузки, в том числе рельсовые ускорители и излучающие магнитные диполи, применяемые в электроразведке, позволило разработать упрощенные физические модели и программное обеспечение для расчета рабочих режимов ЛЭГ на базе обращенного рельсотрона. Для резистивных нагрузок получены и исследованы аналитические решения задачи Коши, моделирующей работу установки в широком диапазоне определяющих параметров. Рассмотрены варианты генераторов с нелинейной индуктивностью, создающие квазипрямоугольные импульсы тока в нагрузке, представляющие интерес при решении задач электроразведки. Проведенное расчетно-теоретическое исследование показывает принципиальную возможность разработок ЛЭГ и их применения для геофизических исследований. Однако доказать работоспособность и эффективность рассмотренных конструкций генераторов поможет только их изготовление и испытание.

Авторы выражают благодарность Е. В. Хаустову за предоставление расчетных данных о параметрах разгонного устройства якоря, результаты работы которого были использованы при выборе начальных условий решения задач о генерации тока в дипольных нагрузках, а также А. С. Лисину и В. П. Панченко за полезное обсуждение результатов численного моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Xiaojun D., Zhengguo L., Guohua P., et al.** Rail stator augmentation magnetic flux compression linear generator used in electric guns // *IEEE Trans. Magn.* 2005. V. 41, N 1. P. 285–289.
2. **Тынников Ю. Г., Толстокулаков Н. А., Крыжин А. В.** Баллистический генератор как источник питания импульсных разрядов // *Материалы I Всесоюз. семинара по динамике сильноточного дугового разряда в магнитном поле*, Новосибирск, 10–13 апр. 1990 г. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1990. С. 263–267.
3. **Глинов А. П., Полтанов А. Е., Кондратенко А. К. и др.** Исследование вывода тока линейного баллистического генератора на индуктивно-омическую нагрузку. М., 1996. (Препр. / Центр. науч.-исслед. ин-т управления, экономики и информации Минатома России; № 0022-А).
4. **Glinov A. P., Poltanov A. E., Kondratenko A. K., et al.** The analysis of linear magnetic flux compressor pulse power supplies // *Proc. of the 6th Europ. EMLT symp.*, Hague (Netherlands), 25–28 May 1997. Delft: TNO PML Pulse Phys. Lab., 1997. P. 86–93.
5. **Тынников Ю. Г., Толстокулаков Н. А., Иванов В. А., Андрианов В. А.** Баллистический магнитокумулятивный генератор // *ПМТФ*. 1998. Т. 39, № 3. С. 22–29.
6. **Велихов Е. П.** Физика и техника мощных импульсных систем. М.: Энергоатомиздат, 1987.
7. **Marshall R.** A reusable inverse railgun magnetic flux compression generator to suit the earth-to space-rail-launcher // *IEEE Trans. Magn.* 1984. V. 20, N 2. P. 223–226.
8. **Полтанов А. Е., Кондратенко А. К., Рындин В. Н. и др.** Экспериментальные исследования многорельсовых ускорителей с высокой погонной индуктивностью. М., 1998. (Препр. / Центр. науч.-исслед. ин-т управления, экономики и информации Минатома России; № 0046-А).

*Поступила в редакцию 12/1 2005 г.,
в окончательном варианте — 8/XI 2005 г.*