

УДК 537.84

ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ В МАГНИТОКУМУЛЯТИВНОМ ГЕНЕРАТОРЕ С ПОМОЩЬЮ ИНДУКТИВНО СВЯЗАННЫХ КОНТУРОВ С ПЕРЕМЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ СВЯЗИ

С. Д. Гилев, В. С. Прокопьев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия
E-mails: gilev@hydro.nsc.ru, prokopiev@hydro.nsc.ru

Предложен метод генерации электромагнитной энергии и магнитного потока в магнитокумулятивном генераторе, основанный на динамическом изменении коэффициента связи контуров. Проведено сравнение данной схемы с известными схемами генерации магнитной энергии с помощью магнитной кумуляции (классический магнитокумулятивный генератор, генератор с трансформаторной связью, генератор с динамическим трансформатором). Показана возможность получения больших значений магнитной энергии с использованием данного метода. Установлено, что предлагаемая схема более эффективна, чем известная трансформаторная схема. Проведены эксперименты по генерации электромагнитной энергии, показавшие эффективность предлагаемого метода.

Ключевые слова: магнитная кумуляция, магнитокумулятивный генератор, электромагнитная энергия, магнитный поток, индуктивно связанные контуры, коэффициент связи, согласование генератора с нагрузкой.

DOI: 10.15372/PMTF20170401

Введение. Эффективным импульсным источником электромагнитной энергии является магнитокумулятивный (МК) генератор [1], в котором энергия взрывчатого вещества (ВВ) преобразуется в электромагнитную энергию. В настоящее время достигнуты следующие рекордные параметры МК-систем: магнитная энергия $W \approx 100$ МДж, ток $I \approx 300$ МА, пиковая мощность $P \approx 10^{13}$ Вт [2], магнитное поле $B \leq 28$ МГц [3]. Такие большие параметры получены при использовании многокаскадных устройств. Каскад МК-генератора представляет собой взрывной узел, элементы которого работают последовательно, что позволяет увеличить поступающую на вход узла энергию или плотность энергии (магнитного поля). Вывод энергии осуществляется в нагрузку, например на вход следующего каскада, содержащего ряд однотипных элементов. Каскады соединяются между собой трансформаторной связью.

Классический однокаскадный МК-генератор состоит из переменной индуктивности L_1 и постоянной нагрузки L_x . При работе МК-генератора индуктивность L_1 уменьшается до нуля, полезная энергия выделяется на нагрузке L_x . В пренебрежении омическим сопротивлением цепи относительная энергия в нагрузке равна $\varepsilon_c = W_{xf}/W_{0c} = 1/\alpha_c + 1$. Здесь $W_{xf} = L_x I_{xf}^2/2$ — магнитная энергия в нагрузке в момент окончания работы генератора;

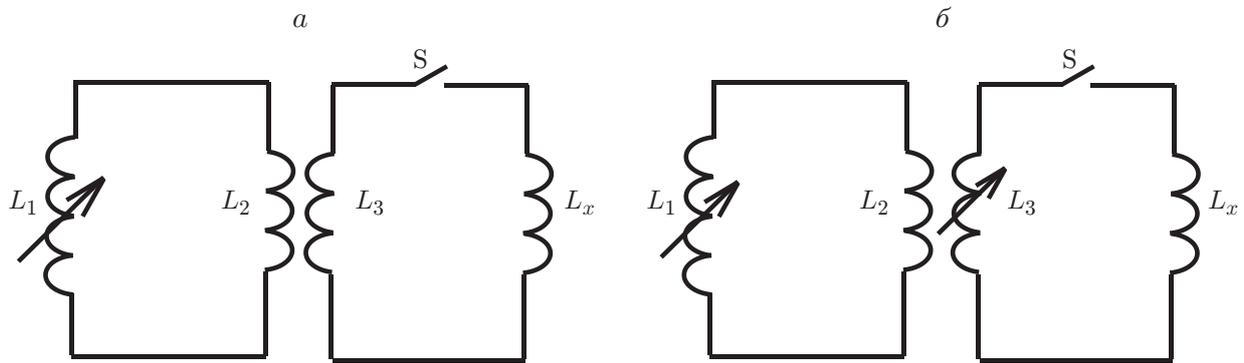


Рис. 1. Схемы согласования работы МК-генератора с нагрузкой:

a — МК-генератор с трансформаторной связью, *б* — двухкаскадный МК-генератор с динамическим трансформатором

I_{xf} — ток в нагрузке в момент окончания работы генератора; $W_{0c} = (L_{10} + L_x)I_0^2/2$ — начальная магнитная энергия в генераторе; L_{10} — начальная индуктивность генератора; I_0 — начальный ток; $\alpha_c = L_x/L_{10}$ — относительная нагрузка. Из зависимости $\varepsilon_c(\alpha_c)$ следует, что классический МК-генератор эффективно работает на малую нагрузку L_x .

При использовании МК-генератора одной из главных технических проблем является согласование его работы с большой нагрузкой. Известны два основных способа решения этой проблемы. Первый способ основан на использовании повышающего трансформатора [4–8]. На рис. 1, *a* приведена электротехническая схема устройства. МК-генератор с переменной индуктивностью L_1 осуществляет вытеснение магнитного потока в индуктивность L_2 , которая служит первичной обмоткой трансформатора. Вторичная обмотка трансформатора L_3 соединена с нагрузкой L_x . При работе МК-генератора ключ *S* замкнут.

В пренебрежении омическим сопротивлением относительная энергия магнитного поля в нагрузке в момент окончания работы МК-генератора с трансформатором равна [4, 6]

$$\varepsilon_t = \frac{W_{xf}}{W_{0t}} = \frac{k^2 \alpha_t}{(1 - k^2 + \alpha_t)^2} \left(\lambda + 1 - \frac{k^2}{1 + \alpha_t} \right). \quad (1)$$

Здесь $W_{0t} = (L_{10} + L_{eff})I_0^2/2$ — начальная магнитная энергия в генераторе с трансформаторной связью; L_{eff} — эффективная индуктивность первичной обмотки трансформатора с учетом наличия вторичной обмотки; k — коэффициент связи обмоток L_2 и L_3 ; $\alpha_t = L_x/L_3$ — относительная нагрузка; $\lambda = L_{10}/L_2$ — отношение индуктивностей в первичной цепи.

Зависимость $\varepsilon_t(\alpha_t)$, определяемая формулой (1), имеет максимум при относительной нагрузке $\alpha_{t*} = 1 - k^2$. В случае большого значения коэффициента связи k максимум энергии достигается при малом значении нагрузки α_t .

Второй способ согласования работы генератора с нагрузкой первоначально получил название “перехват магнитного потока” [9–11]. Позднее более распространенным стал термин “динамический трансформатор”. Данный метод используется при создании многокаскадных схем. Схема двухкаскадного генератора с динамическим трансформатором представлена на рис. 1, *б*. При работе первого каскада индуктивность L_1 уменьшается до нуля и магнитный поток перемещается в индуктивность L_2 , при этом ключ *S* разомкнут. Затем ключ замыкается и второй каскад захватывает магнитный поток. После этого переменная индуктивность L_3 уменьшается до нуля и магнитный поток перемещается в нагрузку L_x . В устройстве используются два последовательно срабатывающих заряда ВВ, осуществляющих деформацию катушек L_1 и L_3 . В однокаскадном варианте данного метода пере-

менная индуктивность L_1 отсутствует и имеется один заряд ВВ, уменьшающий индуктивность L_3 . Метод динамического трансформатора позволяет увеличивать магнитный поток в нагрузке по сравнению с начальным магнитным потоком в системе. Это дает возможность компенсировать уменьшение магнитного потока, происходящее при работе каждого каскада вследствие рассеяния энергии на активном сопротивлении.

В момент окончания работы двухкаскадного генератора с динамическим трансформатором относительная магнитная энергия в нагрузке равна [11]

$$\varepsilon_{2cap} = \frac{W_{xf}}{W_0} = \frac{k^2(\lambda + 1)}{\alpha_{cap}} \quad (2)$$

($W_0 = (L_{10} + L_2)I_0^2/2$ — начальная магнитная энергия в генераторе с динамическим трансформатором; $\alpha_{cap} = L_x/L_{30}$ — относительная нагрузка). Влияние омического сопротивления не учитывается.

Согласно (2) относительная энергия увеличивается при уменьшении нагрузки α_{cap} . Таким образом, схема с динамическим трансформатором (так же как и классическая схема с однокаскадным МК-генератором) оказывается эффективной при малой индуктивности нагрузки.

Способы генерации магнитной энергии на основе принципа магнитной кумуляции не ограничиваются приведенными выше вариантами. Эффективным способом генерации и передачи электромагнитной энергии в нагрузку является динамическое изменение коэффициента связи контуров. При изменении коэффициента связи происходит изменение магнитного потока, что приводит к возникновению ЭДС индукции во вторичном контуре. В [12] предложено передавать энергию между контурами путем поворота одной катушки относительно другой. Поворот катушки на угол, равный 90° , соответствует обращению в нуль взаимной индуктивности и коэффициента связи. Поворот катушки на угол, равный 180° , соответствует изменению знака взаимной индуктивности и коэффициента связи. Изменение коэффициента связи контуров может быть достигнуто также за счет механической деформации катушек при взрыве.

В настоящей работе рассматривается двухконтурная однокаскадная схема магнитной кумуляции, при использовании которой в результате одновременной деформации двух катушек изменяется коэффициент связи контуров. Использование двух пар индуктивно связанных катушек со встречным включением одной из них позволяет осуществлять генерацию электромагнитной энергии и магнитного потока в индуктивной нагрузке. Данная схема предложена в [13, 14], однако ее энергетическая эффективность не исследована. Целью данной работы является определение зависимостей генерируемой энергии и магнитного потока от параметров цепи, в частности от индуктивности нагрузки, а также анализ возможностей передачи энергии в высокоиндуктивную нагрузку.

Двухконтурная однокаскадная схема магнитной кумуляции и ее анализ. На рис. 2 приведена двухконтурная однокаскадная схема магнитной кумуляции. Первичный контур состоит из переменной индуктивности L_1 и постоянной индуктивности L_2 , вторичный контур — из переменной индуктивности L_3 , постоянной индуктивности L_4 и нагрузки L_x . Катушки L_1 , L_3 а также L_2 , L_4 связаны попарно индуктивными связями. Катушки L_1 и L_3 деформируются синхронно одним зарядом ВВ. Катушки L_1 , L_3 , L_4 включены согласно, а катушка L_2 — встречно.

Работа устройства происходит следующим образом. В первичном контуре внешним источником создается ток I_0 . Затем происходит замыкание ключа S во вторичном контуре (до этого момента времени ключ разомкнут и ток во вторичной цепи отсутствует), который захватывает магнитный поток. Одновременно начинается синхронная деформация катушек L_1 и L_3 . Их индуктивности уменьшаются до нуля, и магнитный поток перебрасывается в катушки L_2 (первичный контур) и L_4 , L_x (вторичный контур). Взаимная

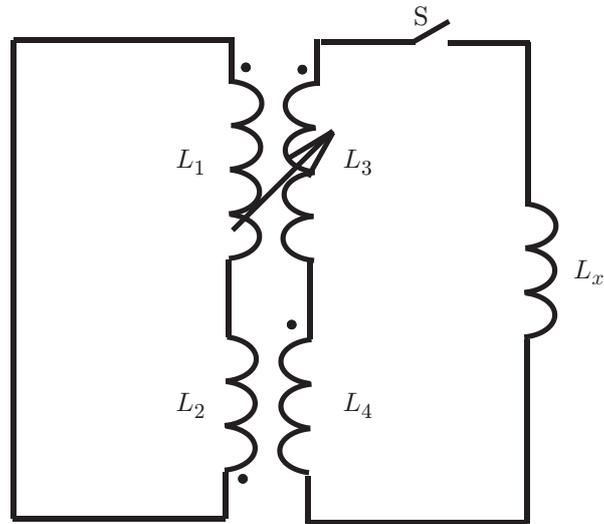


Рис. 2. Двухконтурная однокаскадная схема магнитной кумуляции с переменной индуктивной связью и встречно включенной катушкой

индукция катушек L_1 , L_3 и L_2 , L_4 приводит к возникновению и увеличению тока во вторичной цепи.

Проанализируем работу схемы. Предположим, что омическое сопротивление в цепи отсутствует. В этом случае магнитный поток в контуре сохраняется. Запишем уравнения сохранения магнитного потока для первичного и вторичного контуров:

$$(L_{10} + L_2)I_0 = (L_1 + L_2)I_1 + (M_{13} - M_{24})I_2; \quad (3)$$

$$(M_{130} - M_{24})I_0 = (L_3 + L_4 + L_x)I_2 + (M_{13} - M_{24})I_1. \quad (4)$$

Здесь I_1 , I_2 — ток в первичном и вторичном контурах соответственно; M_{13} — взаимная индуктивность катушек L_1 и L_3 ; M_{130} — их начальная взаимная индуктивность; M_{24} — взаимная индуктивность катушек L_2 и L_4 . Выражения в левых частях уравнений (3), (4) представляют собой начальный поток в первичном и вторичном контурах соответственно, выражения в правых частях соответствуют произвольному моменту времени при работе генератора. Полагается, что все взаимные индуктивности больше нуля. Знак “—” перед взаимной индуктивностью M_{24} в этих уравнениях означает, что катушка L_2 включена встречно с L_1 .

Для анализа работы генератора рассмотрим уравнение (4), описывающее второй контур. Первое слагаемое в правой части (4) представляет собой суммарный магнитный поток в трех индуктивностях контура (L_3 , L_4 , L_x), создаваемый за счет протекания тока в контуре, второе слагаемое — магнитный поток, обусловленный взаимной индукцией между контурами (сумма потоков индукции в катушках L_3 и L_4). Обычно $L_{10} \gg L_2$, $L_{30} \gg L_4$, поэтому первоначально второе слагаемое больше нуля. При работе генератора взаимная индуктивность деформируемой части генератора обращается в нуль ($M_{13} \rightarrow 0$) и второе слагаемое становится отрицательным. (Более того, за счет увеличения тока в первичной цепи I_1 оно становится большим по абсолютной величине.) Таким образом, величина потока взаимной индукции во втором контуре изменяет знак. Можно говорить о перевороте магнитного потока, обусловленном взаимной индукцией между контурами (изменение знака индукционной части потока). Поскольку полный поток в контуре постоянен, следствием изменения знака второго слагаемого в правой части уравнения (4) является увеличение первого слагаемого, т. е. рост магнитного потока, связанного с индуктивностями L_4 , L_x .

Таким образом, происходит генерация магнитного потока в нагрузке L_x , а также увеличение тока I_2 . Переворот части магнитного потока происходит также в первом контуре, что приводит к дополнительному росту тока I_1 и соответственно к увеличению магнитного потока в индуктивности L_2 . Поскольку индукционная часть магнитного потока меняет знак, можно говорить о данном устройстве как об МК-генераторе с переворотом магнитного потока.

Решая систему уравнений (3), (4), находим токи в первичной и вторичной цепях в момент окончания работы генератора, когда $L_1 \rightarrow 0$, $L_3 \rightarrow 0$, $M_{13} \rightarrow 0$:

$$I_{1f} = I_0 \frac{L_{10}L_x + L_2(L_x + L_4) + L_4L_{10} - M_{24}^2 + M_{130}M_{24}}{L_2(L_x + L_4) - M_{24}^2}; \quad (5)$$

$$I_{2f} = I_0 \frac{L_{10}M_{24} + L_2M_{130}}{L_2(L_x + L_4) - M_{24}^2}. \quad (6)$$

Здесь значение $M_{24} > 0$ соответствует встречному включению катушки L_2 . Из (5), (6) следует, что в этом случае при работе генератора достигается больший ток в обоих контурах, чем при согласном включении катушки ($M_{24} < 0$). Если катушки L_1 и L_3 деформируются одновременно, но не связаны между собой индуктивной связью ($M_{13} = 0$), то согласно (5), (6) конечные токи оказываются меньше. Полученный результат можно объяснить следующим образом. Общая ЭДС индукции во вторичном контуре представляет собой сумму ЭДС, генерируемой в катушке L_3 , индуктивно связанной с катушкой L_1 , и ЭДС, генерируемой в катушке L_4 , индуктивно связанной с катушкой L_2 . При работе генератора индуктивности L_1 и L_3 уменьшаются до нуля, так же как и взаимная индуктивность M_{13} . При выбранной полярности включения катушки L_2 ЭДС в катушках L_3 и L_4 имеют один и тот же знак, что обеспечивает больший ток в контуре.

Найдем относительную энергию магнитного поля и магнитный поток в нагрузке в момент окончания работы генератора:

$$\varepsilon = \frac{W_{xf}}{W_0}, \quad \varphi = \frac{\Phi_{xf}}{\Phi_0}. \quad (7)$$

Здесь $\Phi_{xf} = L_x I_{xf}$ — магнитный поток в нагрузке в момент окончания работы генератора; $\Phi_0 = (L_{10} + L_2)I_0$ — начальный магнитный поток в генераторе. Величины ε и φ показывают, во сколько раз энергия магнитного поля и магнитный поток в нагрузке в момент окончания работы генератора больше величины энергии и потока в начальный момент времени.

Из (6), (7) нетрудно получить

$$\varepsilon = \frac{L_x(L_{10}M_{24} + L_2M_{130})^2}{(L_{10} + L_2)(L_2(L_4 + L_x) - M_{24}^2)^2}, \quad \varphi = \frac{L_x(L_{10}M_{24} + L_2M_{130})}{(L_{10} + L_2)(L_2(L_4 + L_x) - M_{24}^2)}.$$

Введем коэффициенты связи катушек L_1 , L_3 и L_2 , L_4 соответственно: $k_{130} = M_{130}/\sqrt{L_{10}L_{30}}$, $k_{24} = M_{24}/\sqrt{L_2L_4}$. Также используем следующие безразмерные параметры: отношение индуктивностей первичного контура $\lambda = L_{10}/L_2$, безразмерную индуктивность нагрузки $\alpha = L_x/L_4$, отношение индуктивностей вторичного контура $\beta = L_{30}/L_4$, отношение начальных индуктивностей катушек L_3 и L_1 $\gamma = L_{30}/L_{10}$. С учетом введенных безразмерных параметров можно получить формулы для относительной энергии и магнитного потока

$$\varepsilon = \frac{\alpha\lambda(\sqrt{\lambda}k_{24} + \sqrt{\beta}k_{130})^2}{(1 + \lambda)(1 - k_{24}^2 + \alpha)^2}, \quad \varphi = \frac{\alpha\lambda\sqrt{\gamma}(\sqrt{\lambda/\beta}k_{24} + k_{130})}{(1 + \lambda)(1 - k_{24}^2 + \alpha)}. \quad (8)$$

Зависимость относительной энергии ε от безразмерной индуктивности нагрузки α немонотонна и имеет максимум при

$$\alpha_* = 1 - k_{24}^2. \quad (9)$$

Это выражение совпадает с формулой, соответствующей трансформаторной схеме, при том же значении коэффициента связи $k_{24} = k$.

Максимальное значение энергии равно

$$\varepsilon_* = \frac{\lambda(\sqrt{\lambda} k_{24} + \sqrt{\beta} k_{130})^2}{4(1 + \lambda)(1 - k_{24}^2)}.$$

Из формулы (8) следует, что безразмерный магнитный поток φ монотонно возрастает при увеличении индуктивности нагрузки α . При $\alpha \gg 1$, $\lambda \gg 1$ предельное значение потока

$$\varphi \rightarrow \sqrt{\gamma}(\sqrt{\lambda/\beta} k_{24} + k_{130}).$$

Схема с переворотом магнитного потока является обобщением известной трансформаторной схемы. Действительно, в частном случае $\beta = 0$ ($L_3 = 0$) (см. рис. 2) получаем трансформаторную схему. С учетом этого из (8) следует, что отношения коэффициентов увеличения энергии и потока для схем с переворотом потока и повышающим трансформатором соответственно равны

$$\frac{\varepsilon_{ch}}{\varepsilon_t} = \left(1 + \sqrt{\frac{\gamma}{\xi}}\right)^2, \quad \frac{\varphi_{ch}}{\varphi_t} = 1 + \sqrt{\frac{\gamma}{\xi}} \quad (10)$$

($\xi = L_4/L_2$). При выводе формулы (10) принято $k_{24} = k_{130} = k$. Выражая величины γ , ξ через отношения числа витков для пары обмоток $L_{30}/L_{10} \approx n_1^2$, $L_4/L_2 \approx n_2^2$, из (10) получаем

$$\frac{\varepsilon_{ch}}{\varepsilon_t} \approx \left(1 + \frac{n_1}{n_2}\right)^2, \quad \frac{\varphi_{ch}}{\varphi_t} \approx 1 + \frac{n_1}{n_2}. \quad (11)$$

Здесь n_1 — отношение числа витков в катушках L_3 и L_1 ; n_2 — отношение числа витков в катушках L_4 и L_2 . Из (11) следует, что величины $\varepsilon_{ch}/\varepsilon_t$ и φ_{ch}/φ_t не зависят от параметров k , α , λ и всегда больше единицы. Таким образом, схема с переворотом магнитного потока более эффективна, чем трансформаторная схема.

На рис. 3 показаны зависимости относительной энергии ε и относительного потока φ от безразмерной индуктивности нагрузки α и отношения индуктивностей вторичного контура β , построенные по формулам (8). Из рис. 3,а следует, что энергия в нагрузке существенно зависит от параметров α и β . При постоянном значении коэффициента β зависимость $\varepsilon(\alpha)$ имеет максимум, положение которого определяется формулой (9). На рис. 3,б видно, что магнитный поток в нагрузке может превышать начальный поток в системе. Генерация потока эффективна при больших значениях коэффициента α и малых значениях β .

На рис. 4 показаны зависимости относительной энергии ε от безразмерной индуктивности нагрузки α , соответствующие предлагаемой схеме, а также зависимости $\varepsilon_t(\alpha_t)$, соответствующая трансформаторной схеме (формула (1)), и зависимости $\varepsilon_{1cap}(\alpha_{cap})$ и $\varepsilon_{2cap}(\alpha_{cap})$, соответствующие однокаскадной и двухкаскадной схемам с динамическим трансформатором. Зависимость $\varepsilon_{2cap}(\alpha_{cap})$ определяется формулой (2). Зависимость $\varepsilon_{1cap}(\alpha_{cap})$ определяется из (2) при $\lambda = 0$, следовательно, $\varepsilon_{1cap} = k^2/\alpha_{cap}$. Зависимость $\varepsilon_c(\alpha_c)$ для классического МК-генератора практически не отличается от зависимости для однокаскадной схемы с динамическим трансформатором, поэтому на рис. 4 не показана.

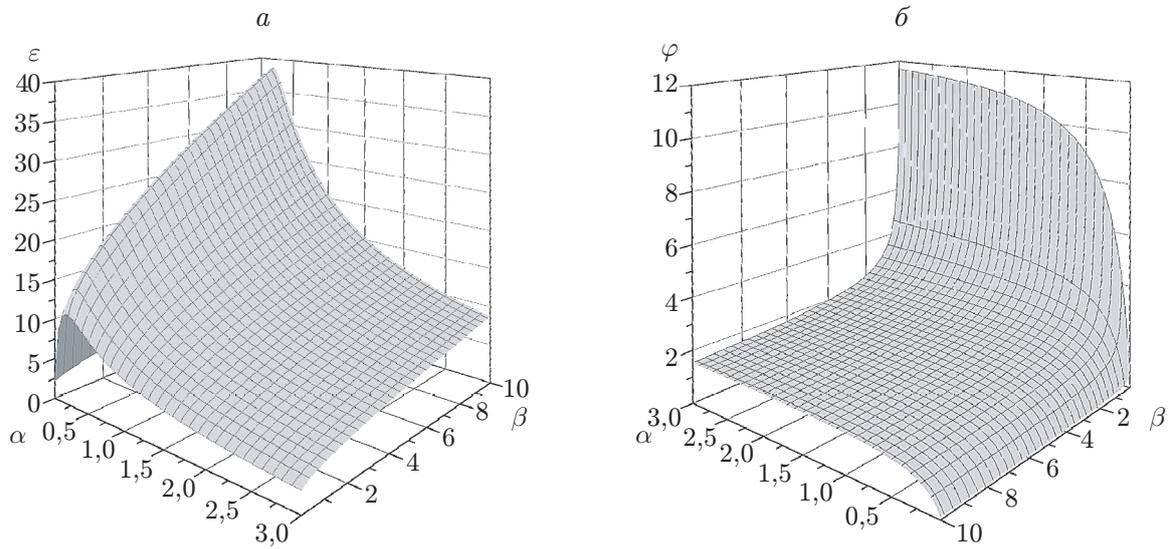


Рис. 3. Зависимости относительной энергии ε (а) и относительного потока φ (б) от безразмерной индуктивности нагрузки α и отношения индуктивностей вторичного контура β при $k_{130} = 0,9$, $k_{24} = 0,9$, $\lambda = 10$, $\gamma = 1$

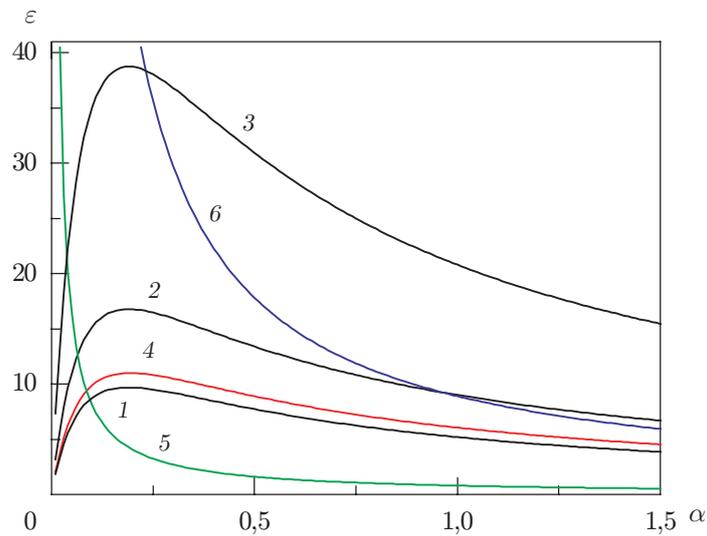


Рис. 4. Зависимости относительной энергии от безразмерной индуктивности нагрузки $\varepsilon(\alpha)$ (1-3), $\varepsilon_t(\alpha_t)$ (4), $\varepsilon_{1cap}(\alpha_{cap})$ (5), $\varepsilon_{2cap}(\alpha_{cap})$ (6) при $k_{130} = 0,9$, $k_{24} = 0,9$, $k = 0,9$, $\lambda = 10$, $\gamma = 1$:

1-3 — предлагаемая схема (1 — $\beta = 0$, 2 — $\beta = 1$, 3 — $\beta = 10$), 4 — трансформаторная схема, 5 — однокаскадная схема с динамическим трансформатором, 6 — двухкаскадная схема с динамическим трансформатором

Из рис. 2 следует, что при $L_3 = 0$ ($\beta = 0$) предлагаемая схема переходит в трансформаторную схему (см. рис. 1, *a*). Кривая 1 на рис. 4 соответствует этому предельному случаю. На рис. 4 видно, что кривая 1 близка к кривой 4, соответствующей трансформаторной схеме. Небольшое различие кривых обусловлено разными начальными условиями. В трансформаторной схеме ключ S замкнут [4, 6]. В предлагаемой схеме ключ замыкается до начала работы генератора. Заметим, что при $\beta > 0,05$ кривая $\varepsilon(\alpha)$, соответствующая предлагаемой схеме, располагается выше кривой $\varepsilon_t(\alpha_t)$, соответствующей трансформаторной схеме. Из результатов сравнения кривых 2, 4, и 3, 4 следует, что при использовании предлагаемой схемы энергия, получаемая в нагрузке, больше, чем при использовании трансформаторной схемы.

Из рис. 4 также следует, что в однокаскадной схеме с динамическим трансформатором коэффициент увеличения энергии $\varepsilon_{1cap} > 20$ при $\alpha_{cap} < 0,04$, а в двухкаскадной схеме $\varepsilon_{2cap} > 40$ при $\alpha_{cap} < 0,22$ (при выбранных значениях коэффициентов связи и отношения индуктивностей первичного контура). При $\alpha \approx 0,2$ предлагаемая схема является более эффективной, чем однокаскадная схема с динамическим трансформатором, но менее эффективной, чем двухкаскадная схема.

Результаты сравнения кривых 3 и 6 на рис. 4 показывают, что при $\beta \gg 1$ в области относительно больших нагрузок ($\alpha > 0,3$) предлагаемая схема является более эффективной, чем двухкаскадная схема с динамическим трансформатором.

Предложенная электротехническая модель работы генератора является максимально простой. Она не учитывает омическое сопротивление катушек и соединяющих их проводов. Полагается, что в процессе деформации катушек L_1 , L_3 их индуктивности обращаются в нуль. Тем не менее принятое приближение позволяет оценить энергетическую эффективность схемы.

Эксперимент. С использованием предлагаемого метода проведен ряд экспериментов. В одном из опытов параметры цепи имели следующие значения: $L_{10} = 2$ мкГн, $L_2 = 0,21$ мкГн, $L_3 = 1,95$ мкГн, $L_4 = 0,2$ мкГн, $L_x = 1,4$ мкГн, $k_{130} = 0,9$, $k_{24} = 0,95$. Катушки L_1 и L_3 представляли собой элементы двухзаходной спирали. Один заход спирали образовывал катушку L_1 , второй — катушку L_3 . В этом случае катушки L_1 и L_3 имеют одинаковое число витков, при этом $\gamma = 1$. Спираль была выполнена из медного эмалированного провода, диаметр которого приближенно равен 1 мм, и имела внутренний диаметр, приближенно равный 60 мм. На оси спирали располагалась медная трубка (внешний диаметр равен 30 мм, длина — 200 мм), выполнявшая функцию обратного токопровода. Трубка заполнялась литым зарядом ВВ (тротил/гексоген 50/50). Детонация ВВ приводила к расширению трубки и ее контакту с витками спирали. Начальная сила тока в первичной цепи равна $I_0 \approx 45$ кА. Осциллограмма тока во вторичной цепи представлена на рис. 5. Видно, что после замыкания во вторичной цепи возникает ток, который со временем увеличивается. В проведенном эксперименте коэффициент увеличения энергии ε оказался равен $4,5 \pm 0,4$, магнитная энергия в нагрузке $W_{xf} \approx 10$ кДж. Значение коэффициента ε , найденное с использованием сформулированной выше модели и начальных параметров экспериментального устройства, равно 4,2, т. е. близко к экспериментальному значению. Теоретические значения относительной энергии для других схем при тех же параметрах цепи составляют 1,3 (трансформаторная схема), 0,13 (однокаскадный динамический трансформатор), 1,4 (двухкаскадный динамический трансформатор). В эксперименте использовалась большая индуктивная нагрузка ($\alpha = 7$); значение α существенно превышало значение α_* , соответствующее максимуму энергии ε_* . В целом проведенный эксперимент показал эффективность предлагаемой схемы.

Обсуждение результатов. Предлагаемый метод имеет сходство с методом динамического трансформатора. Действительно, на рис. 2 ключ S первоначально разомкнут

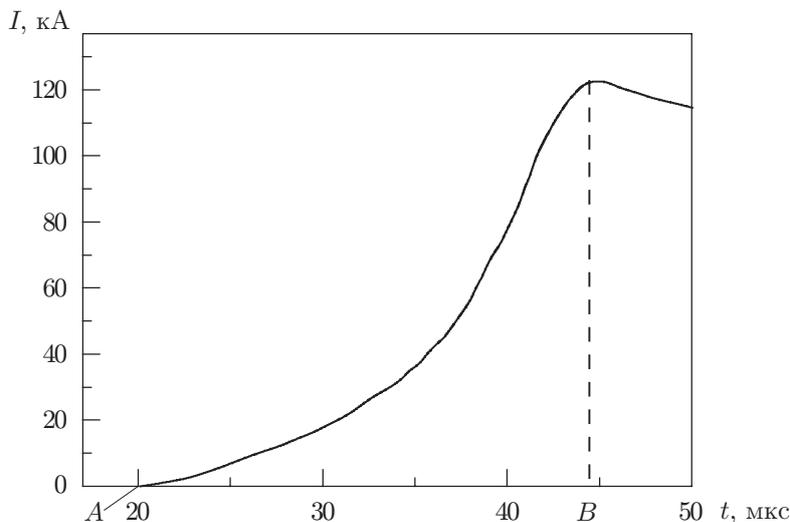


Рис. 5. Экспериментальная зависимость силы тока от времени во вторичной цепи:

A — момент замыкания вторичной цепи и начала работы генератора, B — момент завершения работы генератора

и замыкается непосредственно перед началом работы генератора. В этот момент вторичный контур осуществляет захват магнитного потока, который в дальнейшем сжимается и возрастает.

В то же время предложенную схему можно рассматривать как обобщение трансформаторной схемы согласования МК-генератора с нагрузкой. Действительно, при $L_3 \rightarrow 0$ данная схема переходит в трансформаторную схему. Из (8) следует, что введение дополнительной деформируемой катушки (L_3), индуктивно связанной с первичным контуром, приводит к увеличению энергии в нагрузке. Важным отличием предлагаемой схемы является встречное включение первичной обмотки трансформатора L_2 , что обеспечивает изменение знака индукционной части магнитного потока при работе генератора и приводит к увеличению магнитного потока в нагрузке.

Следует отметить, что применение предлагаемого подхода не приводит к существенному усложнению схемы МК-генератора. Действительно, при использовании в трансформаторном методе в качестве индуктивности L_1 двухзаходной спирали переход от известной трансформаторной схемы к рассматриваемой схеме осуществляется максимально просто и заключается в пересоединении выводов спирали. В трансформаторной схеме оба захода спирали соединяются с первичной цепью. В предлагаемой схеме выводы первого захода спирали соединяются с первичным контуром, а выводы второго захода — с вторичным контуром. При этом используется один и тот же заряд ВВ, что позволяет считать данную схему однокаскадной двухконтурной схемой.

В рассматриваемой схеме могут быть использованы спирали с большим числом заходов. Многозаходные катушки используются в мощных электромагнитных системах с целью уменьшения напряжения между витками и минимизации тепловых и силовых нагрузок. Единственным требованием, предъявляемым к многозаходной катушке в предлагаемой схеме, является четное число заходов и соединение одной части заходов спирали с первичным контуром, а другой части — с вторичным. В этом случае выводы нечетных заходов можно соединить с первичным контуром, а выводы четных — с вторичным контуром. Тогда схема соединения оказывается максимально симметричной в попереч-

ной плоскости катушки, что приводит к уменьшению напряжения между ее заходами и увеличению коэффициента связи.

Данная схема является более эффективной, чем однокаскадная схема с динамическим трансформатором, но менее эффективной, чем двухкаскадная схема. Преимущество двухкаскадной схемы с динамическим трансформатором достигается за счет последовательного срабатывания двух каскадов, каждый из которых содержит собственный заряд ВВ. Тот же принцип (изменение коэффициента связи контуров) можно использовать для создания многокаскадных схем. По-видимому, в этом случае за счет последовательного усиления будет получена большая энергия в нагрузке, чем в однокаскадной схеме.

Заключение. Применение схемы с переворотом магнитного потока позволяет более эффективно генерировать магнитную энергию в нагрузке, чем применение трансформаторной схемы. При умеренных нагрузках ($\alpha \approx 0,2$) настоящая схема является более эффективной, чем схема классического МК-генератора, а при относительно больших нагрузках ($\alpha > 0,5$) она может конкурировать с двухкаскадной схемой с динамическим трансформатором. Схема, основанная на динамическом изменении коэффициента связи контуров, может быть применена в системах генерации электромагнитной энергии, использующих принцип магнитной кумуляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кнопфель Г.** Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
2. **Pavlovskii A. I., Lyudaev R. Z., Boyko B. A.** Disk magnetic cumulation generators maximum characteristics // Megagauss fields and pulsed power system: Proc. of the 5th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Novosibirsk, July 3–7, 1989. N. Y.: Nova Sci. Publ., 1990. P. 327–330.
3. **Bykov A. I., Dolotenko M. I., Kolokolchikov N. P., et al.** VNIIEF achievements on ultrahigh magnetic fields generation // Physica B. 2001. V. 294/295. P. 574–578.
4. **Pavlovskii A. I., Lyudaev R. Z., Pljashkevich L. N., et al.** Transformer energy output magnetic cumulation generators // Megagauss physics and technology: Proc. of the 2nd Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Washington, May 29 — June 1, 1979. N. Y.; L.: Plenum Press, 1980. P. 611–626.
5. **Chernyshev V. K., Davydov V. A.** Ultimate capacities of transformer method of energy transfer from explosive magnetic generator to inductive load // Megagauss physics and technology: Proc. of the 2nd Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Washington, May 29 — June 1, 1979. N. Y.; L.: Plenum Press, 1980. P. 657–662.
6. **Кравченко А. С., Людаев Р. З., Павловский А. И. и др.** Питание индуктивных и омических нагрузок магнитокумулятивного генератора с помощью трансформатора // ПМТФ. 1981. № 5. С. 116–121.
7. **Бухаров В. Ф., Васюков В. А., Гурин В. Е. и др.** Магнитокумулятивные генераторы с трансформаторным выводом энергии // ПМТФ. 1982. № 1. С. 4–10.
8. **Дивнов И. И., Зотов Н. И., Христофоров Б. Д.** Исследование эффективности передачи энергии взрывомагнитного генератора (ВМГ) через согласующий трансформатор в нагрузку // ПМТФ. 1982. № 4. С. 22–26.
9. **Давыдов В. А., Чернышев В. К.** Генерирование магнитного потока способом многоступенчатого перехвата // ПМТФ. 1981. № 6. С. 112–114.
10. **Чернышев В. К., Давыдов В. А., Ванеев В. Е.** Исследование процесса магнитной кумуляции в системах с перехватом магнитного потока // Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение: Тр. 3-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам, Новосибирск, 13–17 июня 1983 г. М.: Наука, 1984. С. 278–280.

11. **Chernyshev V. K., Zarinov E. I., Vaneev V. E., et al.** Effectiveness comparison of explosive magnetic cascade systems // Megagauss fields and pulsed power system: Proc. of the 5th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Novosibirsk, July 3–7, 1989. N. Y.: Nova Sci. Publ., 1990. P. 355–366.
12. **Ви́пф С.** Обратимая передача энергии между индуктивностями // Накопление и коммутация энергии больших плотностей. М.: Мир, 1979. С. 421–434.
13. **А. с. 1550594 СССР, МКИ Н 02 N 11/00.** Взрывной способ трансформации магнитного потока / Е. И. Биченков, В. С. Прокопьев, А. М. Трубачев. Заявл. 25.11.1987; Опубл. 15.03.1990, Бюл. № 10.
14. **Bichenkov E. I., Prokopiev V. S., Trubachev A. M.** Magnetic flux transformation in inductively coupled systems using magnetic cumulation // Megagauss fields and pulsed power system: Proc. of the 5th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Novosibirsk, July 3–7, 1989. N. Y.: Nova Sci. Publ., 1990. P. 601–606.

*Поступила в редакцию 7/VI 2016 г.,
в окончательном варианте — 22/VIII 2016 г.*
