

01;12

# Спиральные магнитокумулятивные генераторы с усилением магнитного потока: к вопросу о сравнительных преимуществах применяемых схем усиления и об эффективности работы генераторов с динамической трансформацией

© А.А. Базанов

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики  
607188 Саров, Россия  
E-mail: aab@elph.vniief.ru

(Поступило в Редакцию 9 ноября 2010 г.)

Аналитически и методом численного моделирования сопоставлены усилительные возможности двух известных типов спиральных магнитокумулятивных генераторов, построенных по каскадной схеме усиления магнитного потока: с динамической трансформаторной и трансформаторной связью между каскадами. Исследована тенденция, к которой ведет учет потерь магнитного потока (энергии), имеющих место в реальных системах. Проанализированы проблемы повышения надежности и эффективности генераторов с динамической трансформацией, связанные с оптимизацией режимов работы и устранением специфических для этих устройств бросков напряжения, возникающих в процессе захвата потока. Предложен способ, позволяющий избежать бросков напряжения.

## Введение

Спиральные генераторы работают на принципе сохранения магнитного потока при деформации замкнутого электрического контура:  $\Phi = I(L + L_W) = \text{const}$ . В процессе деформации индуктивность контура уменьшается ( $L \rightarrow 0$ ), а ток  $I$  возрастает ( $I \rightarrow \Phi/L_W$ ). В результате в нагрузку выводится энергия, намного превышающая первоначально запасенную в генераторе  $E \rightarrow (\Phi^2/2L_W) \gg E_0 = \Phi^2/2(L_W + L_0)$  (предполагается, что индуктивность нагрузки много меньше начальной индуктивности контура  $L_W \ll L_0$ ). Для повышения начальной индуктивности электрический контур генератора (рис. 1) выполняют в форме спирали  $I$ , обычно многозаходной с нарастающим по направлению к нагрузке  $L_W$  шагом и числом заходов. Спираль запитывают от источника электрической энергии (например, конденсаторной батареи  $C$ ), а выведение ее индуктивности осуществляют разлетающейся под действием взрывчатого вещества 2 центральной трубой 3. Подрыв заряда инициируют капсюлем 4. Разработка этих устройств началась в СССР и в США в начале 50-х годов (в СССР — по инициативе А.Д. Сахарова [1]). Современные генераторы этого типа способны накапливать энергию от единиц до 10–20 Мэ и генерировать токи в десятки мегаампер.

Очевидно, что результат работы таких генераторов зависит от величины начального магнитного потока, вводимого в контур. Чтобы избежать необходимости применения энергоемких запитывающих источников, в 70-х годах XX века было предложено использовать каскадную схему построения генераторов сначала с трансформаторной [2], а затем с динамической трансформаторной [3] связью между каскадами, обеспечиваю-

щей наращивание магнитного потока в процессе работы генератора.

При использовании трансформаторной связи трансформаторные узлы выделяют в отдельные элементы, последовательно соединяющие между собой каскады генератора [2]. На рис. 2 это показано на примере двухкаскадной системы. Здесь трансформаторный узел образован первичной  $L_T$  и вторичной  $L_U$  обмотками с коэффициентом взаимной индукции  $M_T$ . Во входной каскад генератора вводят начальный магнитный поток  $\Phi_1(0)$ , после чего деформируют контур, устремляя индуктивность входного каскада к нулю  $L_1(t \rightarrow t_0) \rightarrow 0$ . Нарастающий в первичной обмотке трансформатора ток  $I_1$  индуцирует во вторичном контуре (выходном каскаде)

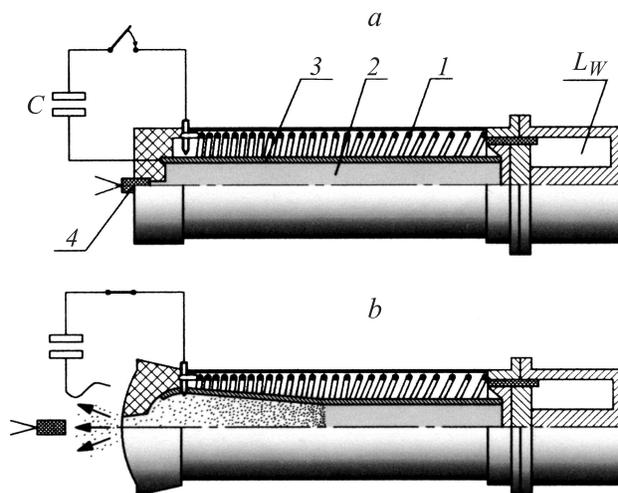


Рис. 1. Спиральный магнитокумулятивный генератор: *a* — в статике; *b* — в работе.

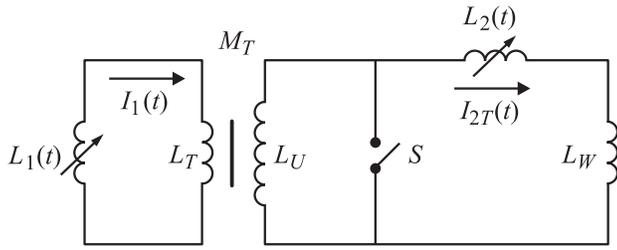


Рис. 2. Двухкаскадный генератор с трансформаторной связью между каскадами.

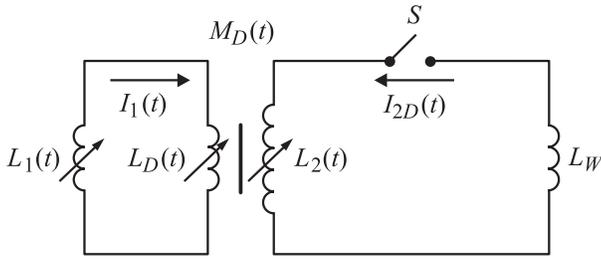


Рис. 3. Двухкаскадный генератор с динамической трансформацией магнитного потока.

ток  $I_{2T}$ , достигающий максимума в момент  $t_0$  обнуления индуктивности  $L_1$ . В этот момент замыкается ключ  $S$  и начинается деформация контура выходного каскада  $L_2(t) \rightarrow 0$ . Возросший в процессе трансформации магнитный поток  $\Phi_{2T}(t_0) = I_{2T}(t_0)(L_2(t) + L_W)$  захватывается в выходном каскаде и выводится в нагрузку  $L_W$ .

В генераторах с динамической трансформаторной связью (их еще называют генераторами с захватом магнитного потока) вторичную обмотку трансформатора совмещают с усилительным каскадом генератора (рис. 3). На приведенной схеме динамический трансформатор образован катушкой связи входного контура  $L_D$  и индуктивностью спирали выходного (усилительного) каскада  $L_2(t)$ , имеющих коэффициент взаимной индукции  $M_D(t)$  (конструктивно динамическую трансформацию обеспечивают за счет охвата катушкой связи выходного каскада). Последовательность операций при динамическом способе трансформации аналогична последовательности в трансформаторном способе. Однако в отличие от трансформаторного способа захват магнитного потока происходит не одновременно с замыканием ключа  $S$ , а протекает как процесс, сопутствующий выведению индуктивности выходного каскада  $L_2(t) \rightarrow 0$  после замыкания этого ключа. Соответственно захваченный магнитный поток при  $t > t_0$  является функцией времени  $\Phi_{2D}(t)$ . Совмещение функций усилительных каскадов и вторичных обмоток трансформаторов в одном элементе позволяет упростить конструкцию и, кроме того, по мнению авторов этого предложения В.К. Чернышева и В.А. Давыдова такие генераторы могут обеспечивать более высокий коэффициент усиления магнитного потока по сравнению с трансформаторной схемой [3,4].

Работоспособность генераторов этого типа В.К. Чернышев и В.А. Давыдов подтвердили экспериментально [4,5]. О перспективности применения этих устройств свидетельствует и ряд работ недавнего времени других исследователей, например, [6].

Однако вопрос о сравнительных преимуществах и недостатках генераторов с динамической трансформацией остался не до конца выясненным.

## Сравнительный анализ двух методов трансформации генераторов без потерь

Сравним коэффициенты усиления потока в двухкаскадных генераторах с динамическим трансформаторным и трансформаторным способами связи контуров. Если не учитывать потери энергии, то такое сравнение можно выполнить аналитически.

Нетрудно убедиться, что для генераторов с трансформаторной связью (рис. 2) магнитный поток, переданный в выходной каскад генератора (в индуктивности  $L_2$  и  $L_W$ ), к моменту  $t_0$  замыкания ключа  $S$  равен

$$\begin{aligned} \Phi_{2T}(t_0) &= I_{2T}(t_0)(L_2(t_0) + L_W) \\ &= \Phi_1(0) \frac{(L_2(t_0) + L_W)M_T}{(L_2(t_0) + L_W + L_U)L_{\text{eff}}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $L_{\text{eff}}$  — эффективная индуктивность трансформаторного узла связи,

$$L_{\text{eff}} = L_T - \frac{M_T^2}{L_2(t_0) + L_W + L_U}. \quad (2)$$

Рассмотрим работу генератора с динамической трансформаторной связью (рис. 3). Для большей корректности последующего сравнения в отличие от [3,4] будем полагать, что катушка связи является деформируемым электрическим контуром, т. е. имеем переменную индуктивность  $L_D(t)$ .

После замыкания ключа  $S$  для генератора с динамической трансформацией справедлива система уравнений:

$$\begin{cases} L_D(t)I_1(t) + M_D(t)I_{2D}(t) = I_1(t_0)L_D(t_0) = \Phi_1(0), \\ L_2(t)I_{2D}(t) + M_D(t)I_1(t) + L_W I_{2D}(t) = I_1(t_0)M_D(t_0), \\ M_D(t) = k_D(t)\sqrt{L_D(t)L_2(t)}. \end{cases} \quad (3)$$

Решив ее, получаем зависимость магнитного потока в выходном каскаде от времени

$$\begin{aligned} \Phi_{2D}(t) &= \Phi_1(0) \frac{k_D(t_0)\sqrt{\frac{L_2(t_0)}{L_D(t_0)}} - k_D(t)\sqrt{\frac{L_2(t)}{L_D(t)}}}{L_W + L_2(t)(1 - k_D(t)^2)} \\ &\quad \times (L_W + L_2(t)), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $k_D(t)$  — коэффициент связи между каскадами.

Если катушка связи охватывает выходной каскад генератора только на части его длины, то справедливо

условие  $k_D(t_c) \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow t_c$ . Тогда для магнитного потока в выходном каскаде в момент  $t_c$  имеем

$$\Phi_{2D}(t_c) = \Phi_1(0)k_D(t_0)\sqrt{\frac{L_2(t_0)}{L_D(t_0)}}. \quad (5)$$

Для обеспечения идентичности условий работы входных генераторов  $L_1(t)$  в обоих схемах (динамической трансформаторной и трансформаторной) следует потребовать равенства их нагрузок, т.е.  $L_D(t_0) = L_{\text{eff}}$ . Принимая во внимание (2), равенство  $M_T = k_T\sqrt{L_T L_U}$ , и сравнивая (5) с (1), находим

$$\frac{\Phi_{2D}(t_c)}{\Phi_{2T}(t_0)} = \frac{k_D(t_0)}{k_T} \left(1 + \frac{L_U}{L_2(t_0) + L_W}\right) \times \sqrt{\frac{L_2(t_0)}{L_U} \left(1 - \frac{k_T^2 L_U}{L_2(t_0) + L_W + L_U}\right)}, \quad (6)$$

где  $k_T$  — коэффициент связи в трансформаторной схеме.

Полагая качество изготовления узлов связи в обоих схемах идентичным, считаем  $k_D(t_0) = k_T = k$ . Тогда учитывая, что  $L_2(t_0) \gg L_W$ , и обозначая  $L_2(t_0)/L_U = m$ , из (6) имеем

$$\frac{\Phi_{2D}(t_c)}{\Phi_{2T}(t_0)} \approx \left(1 + \frac{1}{m}\right) \sqrt{m \left(1 - \frac{k^2}{m+1}\right)}. \quad (7)$$

Несложно убедиться, что в (7) функция

$$f(m, k) = \left(1 + \frac{1}{m}\right) \sqrt{m \left(1 - \frac{k^2}{m+1}\right)} \quad (8)$$

больше единицы при любых значениях  $m > 0$  и  $k \leq 1$ . Поэтому в рассматриваемом случае всегда справедливо неравенство

$$\frac{\Phi_{2D}(t_c)}{\Phi_{2T}(t_0)} > 1, \quad (9)$$

т.е. динамическая трансформаторная связь оказывается эффективнее трансформаторной при любом значении коэффициента связи.

Отношение  $\Phi_{2D}(t_c)/\Phi_{2T}(t_0)$  как функция  $m$  имеет минимум при  $m = \sqrt{1-k^2}$ , равный

$$\frac{\Phi_{2D}(t_c)}{\Phi_{2T}(t_0)} \Big|_{m=\sqrt{1-k^2}} = 2 - k^2 > 1. \quad (10)$$

Соответственно при таком значении  $m$  преимущество схемы с динамической трансформацией минимально.

В случае, когда  $k_D(t_c) > 0$  (например, катушка связи охватывает выходной каскад на всей его длине) и выполняется условие

$$\frac{k_D(t_0)}{k_D(t_c)} \sqrt{\left(\frac{L_2(t_0)}{L_D(t_0)}\right) \left(\frac{L_D(t_c)}{L_2(t_c)}\right)} \gg 1, \quad (11)$$

производя аналогичные преобразования, получаем почти тот же (с точностью до коэффициента  $\beta \geq 1$ ) результат

$$\frac{\Phi_{2D}(t_c)}{\Phi_{2T}(t_0)} \approx \beta f(m, k) > 1, \quad (12)$$

где

$$\beta = \begin{cases} 1 & \text{при } L_2(t_c) \ll L_W, \\ \frac{1}{1-k_D(t_c)^2} > 1 & \text{при } L_2(t_c)(1-k_D(t_c)^2) \gg L_W. \end{cases} \quad (13)$$

При этом минимум отношения  $\Phi_{2D}(t_c)/\Phi_{2T}(t_0)$  при фиксированном значении  $k$  становится равным

$$\frac{\Phi_{2D}(t_c)}{\Phi_{2T}(t_0)} \Big|_{m=\sqrt{1-k^2}} = \beta(2-k^2) > 1, \quad (14)$$

т.е. преимущество схемы с динамической трансформацией дополнительно возрастает в  $\beta$  раз.

## Сравнительный анализ двух методов трансформации с учетом потерь энергии на активных сопротивлениях контуров

Тенденцию, к которой ведет учет потерь энергии на активных сопротивлениях генераторов, можно выявить исходя из следующих соображений.

По условиям сравнения запитывающие и выходные каскады обоих типов генераторов конструктивно идентичны. Идентичны и условия работы запитывающих каскадов. Однако для выходных каскадов это не так. В момент начала работы выходного каскада генератора с трансформаторной схемой усиления в нем захватывается сразу весь магнитный поток, переданный ему через трансформатор, тогда как в схеме с динамической трансформацией начальный магнитный поток в выходном каскаде равен нулю и нарастает по мере его генерации в узле динамической связи. Соответственно при равенстве конечных токов в нагрузке в любой момент времени (за исключением момента окончания работы генераторов  $t_{\text{max}}$ ) справедливо неравенство  $I_{2T}(t) > I_{2D}(t)$ . Полагая для целей сравнения сопротивление  $R(t)$  выходных каскадов идентичным, находим, что потери потока в выходном каскаде генератора с динамической трансформацией будут меньшими, чем в генераторе с классической трансформаторной связью:

$$\Delta\Phi_{2D} = \int_{t_0}^{t_{\text{max}}} R(t)I_{2D}(t)dt < \Delta\Phi_{2T} = \int_{t_0}^{t_{\text{max}}} R(t)I_{2T}(t)dt.$$

Таким образом, теоретически при учете активного сопротивления контуров сравнительные преимущества генератора с динамической трансформацией должны возрастать.

Однако проведенный анализ не является полным, поскольку не учитывает распределение возникающих вдоль

спиралей электрических напряжений, которые являются одним из основных факторов риска, приводящих к отказу генераторов вследствие электрических пробоев изоляции. Последнее может существенным образом повлиять на результаты сравнительного анализа. Решение этой задачи требует выполнения численных расчетов.

## Расчетная модель для сравнительного анализа при наличии потерь энергии

В расчетной модели для целей сравнения предполагалось, что активные сопротивления каскадов генераторов на рис. 2 и 3 могут быть рассчитаны по формуле (15) с коэффициентами совершенства  $f_1$  и  $f_2$  для входного и выходного каскадов соответственно

$$R = -(1 - f) \frac{dL}{dt}. \quad (15)$$

Индуктивности первичной  $L_T$  и вторичной  $L_U$  обмоток трансформатора находились из соотношения (2) с учетом условий  $L_D(t_0) = L_{\text{эф}}$  и  $m = \sqrt{1 - k^2}$ , из которых следует, что

$$L_T = L_D(t_0) \left( 1 - \frac{k^2 L_U}{L_2(t_0) + L_U + L_W} \right)^{-1}, \quad (16)$$

$$L_U = \frac{L_2(t_0)}{\sqrt{1 - k^2}}. \quad (17)$$

Конструктивное исполнение генератора с динамической трансформацией, использованное в расчетной модели, представлено на рис. 4. Предполагалось, что разлетающаяся труба 3 замыкает катушку связи 1 на обратный проводник 4 в месте удара А по спирали выходного каскада 2. Геометрические параметры и параметры намотки спиралей входного  $L_1(t)$  и выходного  $L_2(t)$  каскадов, а также катушки связи  $L_D(t)$  приведены в табл. 1–3.

Предполагалось также, что генератор с трансформаторной связью имеет идентичное с генератором с динамической трансформацией исполнение входного и выходного каскадов. При этом геометрия взаимного расположения каскадов несущественна.

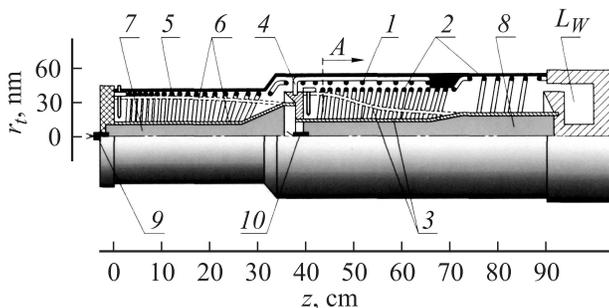


Рис. 4. Конструкция генератора с динамической трансформацией.

Таблица 1. Зависимость радиуса трубы  $r_t$  от координаты  $z$  для генератора с динамической трансформацией

$z, \text{cm}$	Входной каскад		Выходной каскад		
	0–24	28–33	37–63	63–70	70–90
$r_t, \text{mm}$	19	Конус 19 → 27	22	Конус 22 → 29	29

Сначала рассчитывался генератор с динамической трансформаторной связью. Из этого расчета определялись начальные значения индуктивности катушки связи  $L_D(t_0)$ , коэффициента связи  $k = k_D(t_0)$  и индуктивности выходного каскада  $L_2(t_0)$ . Затем вычислялись соответствующие им параметры генератора с трансформаторной схемой усиления магнитного потока  $L_T$  и  $L_U$  (по формулам (16), (17)) и находился ток выходной обмотки трансформатора, после чего производился численный расчет работы выходного каскада.

Численный расчет генераторов (каскадов генераторов) выполнялся методами, изложенными в [7].

В расчетах ток начальной запитки для обоих типов генераторов составлял 20 кА, индуктивность нагрузки  $L_W = 15 \text{ нН}$ . Коэффициент  $f_1$  принимался равным:

— для запитывающего каскада  $f_1 = 0.75$  (исключая катушку связи),

— для катушки связи генератора с динамической трансформацией коэффициент  $f_1$  варьировался от 1 до 0.5, либо потери энергии в катушке связи учитывались прямым введением активного сопротивления  $R_i(t)$  в ее контур.

Для выходного каскада предполагалось, что  $f_2 = 0.75$  на участке спирали диаметром 80 мм и  $f_2 = 0.8$  на участке диаметром 110 мм.

## Результаты расчетного моделирования и их обсуждение

В табл. 4 приведены расчетные данные об абсолютной и относительной величинах выходных токов двух типов генераторов, причем для генератора с динамической трансформацией данные приведены в зависимости от поведения активного сопротивления катушки динамической связи (от  $f_1$  и  $R_i(t)$ ).

В табл. 4 использованы следующие обозначения:  $t_D, t_T$  — моменты завершения работы генераторов с динамическим и разделительным трансформаторами соответственно,  $\Delta t$  — время движения контактной точки вдоль катушки связи.

Наибольшее преимущество динамического способа трансформации ( $I_{2D}(t_D)/I_{2T}(t_T) \approx 2.2$ ) достигается, когда потери энергии в контуре катушки связи невелики. Однако эти режимы работы предъявляют повышенные требования к электропрочности изоляции выходной спирали. На рис. 5, а представлены расчетные кривые распределения напряжения для различных вариантов

Таблица 2. Параметры спирали входного каскада и катушки связи

$z, \text{cm}$	Входной каскад						Катушка связи		
	Шаг спирали, mm	0–4	4–8	8–14	14–20	20–26	26–32	32–37	37–43
Число заходов	10	12	16	24	48	96	1000		224
Радиус спирали, mm	2		3	4	8	12	16		
	35						35 → 47	47	

Таблица 3. Параметры спирали выходного каскада

$z, \text{cm}$	43–47	47–51	51–57	57–63	63–69	69–72	72–80	80–90
Шаг спирали, mm	10	12	14	24	48	1000	72	128
Число заходов	2		3	4	8	12		16
Радиус спирали, mm	42					42 → 55	55	

Таблица 4. Расчетные данные

Генератор с разделительным трансформатором	Выходной ток $I_{2T}(t_T)$ , MA	1.6			
Генератор с динамической трансформацией	Коэффициент $f_1$ для катушки связи	1	0.5	–	–
	Сопротивление катушки связи $R_i(t)$	–	–	$\frac{10}{\Delta t} t, \text{m}\Omega$ $0 \leq t \leq \Delta t$	$\frac{40}{\Delta t} t, \text{m}\Omega$ $0 \leq t \leq \Delta t$
	Выходной ток $I_{2D}(t_D)$ , MA	3.5	3.2	3.0	2.92
	Отношение выходных токов $I_{2D}(t_D)/I_{2T}(t_T)$	2.2	2.0	1.9	1.83

поведения сопротивления катушки связи, приведенных в табл. 4. Как видно из рисунка, при использовании катушек связи с омическими потерями, соответствующими коэффициентам совершенства 0.5–1, возникает выброс напряжения на завершающей стадии захвата потока в спирали выходного каскада, который превышает изначально установившийся уровень в 1.4–2.4 раза (рис. 5, *a*, кривые 1 и 2). Появление блока напряжения индуцируется значительным нарастанием тока в короткозамкнутом контуре катушки связи к концу ее работы (рис. 5, *b*, кривые 1 и 2), сопровождающимся резким падением коэффициента связи контуров или разрывом контура катушки связи.

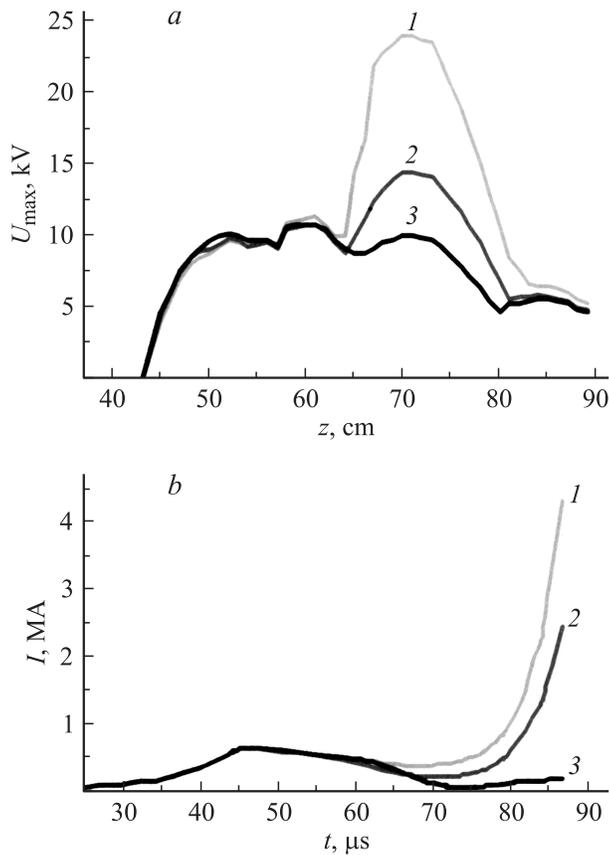
Подобные броски напряжения приводят либо к снижению надежности работы генераторов из-за пробоев, либо к росту потерь магнитного потока из-за его паразитных отсечаний на изоляционном слое спирали, толщину которого приходится увеличивать.

Броски напряжения можно предотвратить, если относительно плавно вводить в контур катушки связи активное сопротивление после того, как выходной каскад будет замкнут. Распределение напряжения вдоль выходного каскада для случаев, когда сопротивление катушки связи в процессе выведения ее индуктивности

линейно изменяется от 0 до 10–40 мΩ представлено на рис. 5, *a* кривой 3 (относительное отклонение кривых напряжения в указанном диапазоне сопротивлений не превышает 4%). На рис. 5, *b* (кривая 3) показано, как в этих случаях ведет себя ток в катушке связи. Видно, что к моменту окончания захвата магнитного потока он плавно падает до нуля, что позволяет устранить скачок напряжения в выходном каскаде. В указанных режимах работы выходной ток генератора с динамической трансформацией несколько снижается, но его преимущество по сравнению с трансформаторными системами по-прежнему остается довольно высоким. Как следует из табл. 4, отношение выходных токов для двух типов генераторов составляет 1.83–1.9.

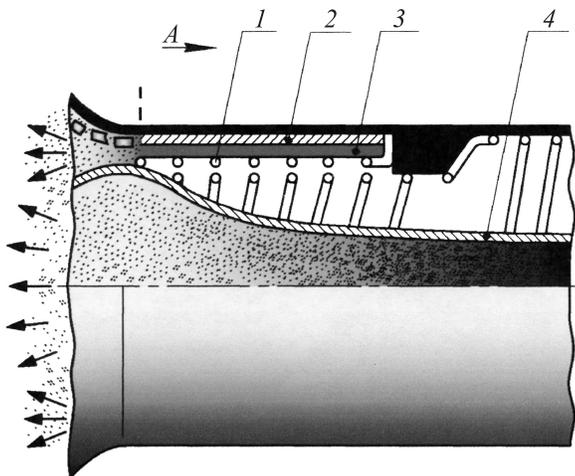
Отметим, что если сопротивление в контур катушки связи ввести быстро (например, в случае неуправляемого разрыва контура), то это приведет к резкому падению тока в катушке, что спровоцирует индукционный вброс магнитного потока в выходной каскад генератора, скачок напряжения на спирали и возможный ее пробой.

С точки зрения практической реализации рассмотренного способа подавления бросков напряжения можно сказать следующее. Результаты исследований, проводимых, в частности, в РФЯЦ-ВНИИЭФ [8], показывают,



**Рис. 5.** Расчетные кривые: *a* — распределения напряжения на спирали выходного каскада, *b* — нарастания тока в катушке связи.

что подобное поведение сопротивления характерно для узлов разрыва, работающих на принципе скользящей детонации взрывчатого вещества, распространяющейся вдоль тонкого проводника. С учетом сказанного для подавления броска напряжения обратный токопровод катушки связи *I* (рис. 6) можно выполнить из прово-



**Рис. 6.** Исполнение обратного токопровода катушки связи.

дящих полос 2, уложенных на подложку из взрывчатого материала 3. Ударом разлетающейся центральной трубы 4 в подложке 3 инициируется детонация, которая распространяется вдоль катушки связи 1 одновременно с движением контактной точки А и рвет проводники 2. За счет этого могут обеспечиваться синхронизация процессов захвата магнитного потока и разрыва контура катушки связи, а также поддержание требуемого уровня сопротивления до тех пор, пока не завершится процесс детонации в подложке.

## Заключение

Проведенный анализ двухкаскадных схем построения генераторов с усилением магнитного потока показал, что для систем без потерь при выполнении условий (7) или (16) генераторы с динамической трансформацией магнитного потока эффективнее генераторов, построенных по классической трансформаторной схеме, не менее, чем в  $\beta(2-k^2)$  раз при любом значении коэффициента трансформаторной связи  $k$ , где коэффициент  $\beta \geq 1$  (см. (15), (18), (19)). При учете потерь энергии на активном сопротивлении генераторов преимущество систем с динамической трансформацией с точки зрения усиления магнитного потока дополнительно возрастает.

Однако реализация указанного преимущества осложняется возникновением броска напряжения на завершающей стадии захвата магнитного потока, что может приводить к пробоям изоляции, приводящим к отказам или существенно снижающим эффективность работы генераторов. Расчетно на конкретном примере показано, что проблема может быть решена путем плавного введения сопротивления в контур катушки динамической связи и его удержания на уровне единиц—десятков миллиОм в период захвата магнитного потока. Предложено техническое решение для практической реализации этого способа.

Таким образом, проведенный анализ дополняет выводы [3–5] о сравнительных преимуществах генераторов с динамической трансформаторной связью, внося в них существенные уточнения и ограничения.

## Список литературы

- [1] Сахаров А.Д., Людаев Р.З., Павловский А.И., Чернышев В.К. и др. // ДАН СССР. 1965. Т. 196. № 1. С. 65.
- [2] Павловский А.И., Людаев Р.З., Пляшкевич Л.Н., Гурин В.Е. Взрывомагнитный генератор. А. с. № 266100 (СССР). Бюл. изобретений. 1970. № 11.
- [3] Чернышев В.К., Давыдов В.А. Взрывной способ генерирования магнитного потока. А. с. 686131 (СССР). Н02N11/00. Бюл. изобретений. 1979. № 34.
- [4] Давыдов В.А., Чернышев В.К. // Журн. прикл. механики и техн. физики. 1981. Т. 130. № 6. С. 112.

- [5] Чернышев В.К., Давыдов В.А., Ванеев В.Е. // Тр. 3-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственным экспериментам. Новосибирск, 1983. М.: Наука, 1984. С. 278.
- [6] Mintsev V.B., Ushnurtsev A.E., Fortov V.E., Leontyev A.A., Shurupov A.V. // Proc. of the IX<sup>th</sup> Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. Sarov, 2002. Publishing-Printing Complex of the RFNC-VNIIFP, 2004. P. 161.
- [7] Morozov I.V., Skobelev A.N., Pak S.V. // Proc. of the 15<sup>th</sup> Int. Conf. on High-Power Partical Beams. SPb., 2005. P. 315.
- [8] Чернышев В.К., Вахрушев В.В., Волков Г.И., Иванов В.А., Пак С.В., Скобелев А.Н. // Хим. физики. 2001. Т. 20. № 9. С. 69.