

УДК 537.872

Подходы к получению сверхсильного магнитного поля путем управляемого изменения эффективной магнитной связи и распределения тока в обмотке магнитокумулятивного генератора

Гришин Ф. А., Крячко А. Ф.

Постановка задачи: наличие у противодействующих сторон широкого спектра радиоэлектронных систем, формирует необходимость оснащения защищаемых объектов и мобильных групп средствами противодействия, решающими задачи подавления и вывода из строя электронной компонентной базы, входящей в состав беспилотных систем, систем связи, исполнительных устройств, систем сбора данных и управления. Разработка систем электродинамического подавления, на базе импульсных источников электромагнитного излучения, в качестве альтернативы кинетическому подавлению, предполагает использование принципов магнитокумулятивной генерации, что объясняет большой интерес к синтезу электродинамической модели магнитокумулятивного генератора многократного действия, а также конструкции индуктивного элемента и способов управляемого изменения эффективной магнитной связи. **Целью работы** является разработка электродинамической модели плазменно-управляемого дросселя с катушкой Биттера и радиально-импульсной плазменной системой, обеспечивающей управление индуктивным элементом, реализующим принципы магнитной кумуляции энергии. **Используемые методы:** при решении задачи используются методы математического анализа, конструктивный анализ, теория аппроксимаций, методы оптимизации, математическое и компьютерное моделирование. **Новизна:** элементами новизны представленного решения является использование способа управления индуктивностью катушки, являющейся составной частью магнитокумулятивного генератора, который, в отличие от известных, базируется на неразрушающем плазменном воздействии на индуктивный элемент, что позволило отказаться от использования энергии взрыва для деформации цилиндрического проводящего лайнера, применяемого в магнитокумулятивном генераторе второго типа (МКГ-2). Предложен способ управляемого изменения эффективной магнитной связи и распределения тока в обмотке индуктивного элемента, через введение проводящей плазмы в зазор между обмоткой и проводящим или полупроводящим экраном. Предложено и обосновано использование индуктивного элемента, выполненного по схеме Биттера, в отличие от катушек, выполненных намоткой из проволоки (МКГ-1), либо спиральной фрезеровкой (МКГ-2), что позволило увеличить механическую и электрическую прочность катушки, эффективно осуществлять отвод тепла, а также противодействовать помехотворным силам, возникающим при пропускании импульса тока через катушку. **Практическая значимость:** использование принципов магнитной кумуляции с индуктивным элементом многократного действия, дает возможность синтеза облика компактных систем дистанционного электромагнитного воздействия на электронные устройства, коммерческие дроны, средства связи и элементы электронной компонентной базы, с целью частичного, либо полного нарушения работоспособности последних. Показано, что разработанный способ управляемого изменения эффективной магнитной связи и распределения тока в обмотке через введение проводящей плазмы в зазор между обмоткой и проводящим или полупроводящим экраном, позволяет решить проблему многократного использования магнитокумуля-

Библиографическая ссылка на статью:

Гришин Ф. А., Крячко А. Ф. Подходы к получению сверхсильного магнитного поля путем управляемого изменения эффективной магнитной связи и распределения тока в обмотке магнитокумулятивного генератора // Системы управления, связи и безопасности. 2026. № 2. С. 69-80. DOI: 10.24412/2410-9916-2026-2-069-080

Reference for citation:

Grishin F. A., Kryachko A. F. Approaches to obtaining an ultra-strong magnetic field by controlling changes in the effective magnetic coupling and current distribution in the winding of a magnetic accumulator generator. *Systems of Control, Communication and Security*, 2026, no. 2, pp. 69-80 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2026-2-069-080

лятивного генератора. **Направления дальнейшего развития работы:** рассмотренный подход будет интересен: специалистам в области радиотехники, при исследовании задач прикладной электродинамики, проектировании и оптимизации систем генерации мощных электромагнитных импульсов.

Ключевые слова: индуктивный элемент, магнитная кумуляция, магнитокумулятивная генерация, проводящий лайнер, радиально-импульсная плазменная система, электромагнитная волна, электромагнитное воздействие.

Актуальность

Разработка импульсных источников электромагнитного излучения, предназначенных для подавления и вывода из строя электронных устройств, связана с необходимостью синтеза облика источника энергии. В простейшем случае, источником энергии может служить электрическое или магнитное поле контура с током, а в качестве накопителя энергии – конденсаторная батарея, которая становится составной частью импульсных источников электромагнитного излучения.

Классификация типов поражения электронных устройств, требует проведения статистически достоверных испытаний для каждого вида тест-объектов с учетом геометрии и времени экспозиции, однако, даже имеющийся к настоящему времени опыт позволяет делать ряд общих утверждений [1, 2]. Напряженность электрического поля достаточная для уверенного воздействия на подсистемы беспилотного летательного аппарата (БЛА), приводящего к потере управления, составляет 7–10 кВ/м при времени воздействия 1–3 с, для некоторых устройств порог воздействия составляет 3–5 кВ/м. При полях 25–30 кВ/м с большой вероятностью происходит вывод из строя электронных устройств [3].

Следует учесть, что запас удельной энергии в диэлектриках: $\epsilon_0 \epsilon E^2/2$, где: ϵ_0 , ϵ — диэлектрическая проницаемость вакуума и вещества; E — напряженность электрического поля, и в магнетиках: $\mu_0 \mu H^2/2$, где μ_0 , μ — магнитная проницаемость вакуума и вещества; H — напряженность магнитного поля, обычно не превышает 100 Дж/л.

Для взрывчатых веществ (ВВ) удельная энергия:

$$\rho D^2/16 \approx 10 \text{ МДж/л,}$$

где ρ — плотность ВВ; D — скорость волны детонации. Таким образом, использование в качестве источника энергии конденсаторных батарей, способных аккумулировать порядка десятков мегаджоулей, является сложной задачей.

Идея увеличения концентрации энергии магнитного поля контура с током, для формирования высокоэнергетичного магнитного импульса [4], впервые предложена академиком А.Д. Сахаровым, в ходе работ над созданием термоядерного заряда. Было показано, что при сохранении магнитного потока путем быстрого уменьшения индуктивности контура с током, сближая с помощью взрыва прямой и обратный проводники, можно преобразовать энергию ВВ в энергию магнитного поля, причем тем эффективнее, чем больше энергия поля по сравнению с джоулевым теплом. В самом общем виде этот способ реализуется в устройствах двух типов: направленный внутрь взрыв (импlosion) применяется в генераторах сверхсильных магнитных полей для увеличения плотно-

сти энергии (рис. 1), направленный наружу взрыв используется в мощных импульсных генераторах электромагнитной энергии (рис. 2).

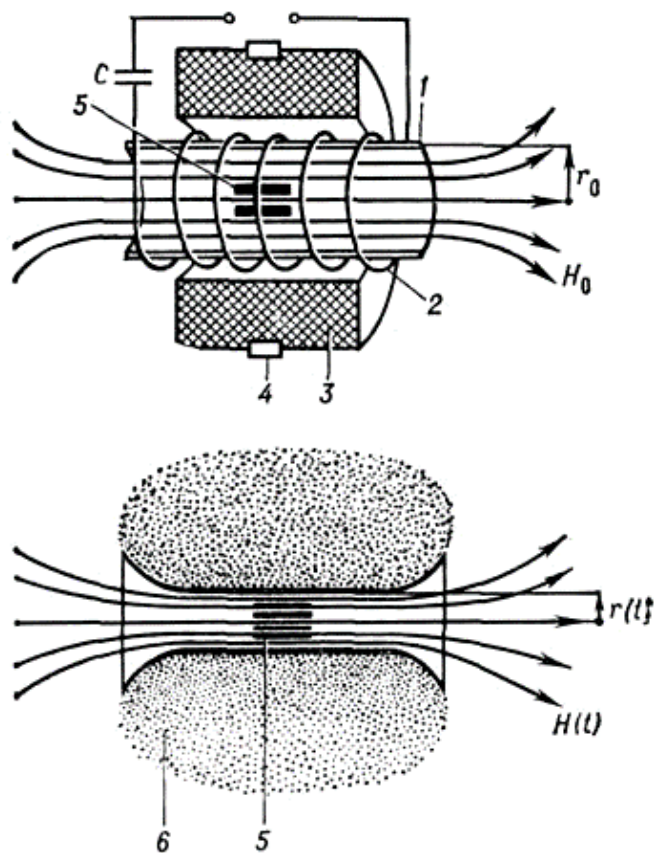


Рис. 1. Магнитокумулятивный генератор первого типа

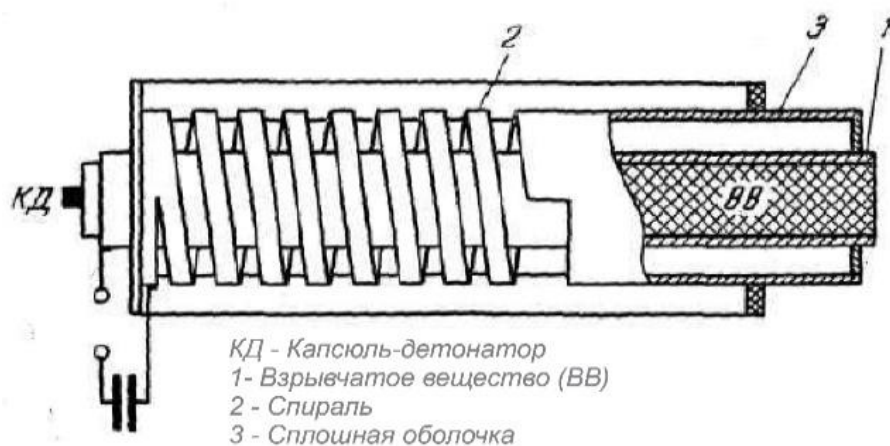
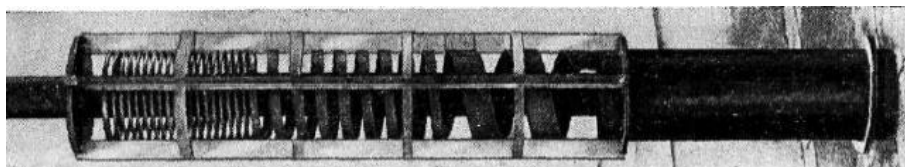


Рис. 2. Магнитокумулятивный генератор второго типа

Вместе с тем, для практических целей использование ВВ приводит к разрушению установки генерации, что не всегда целесообразно, так как ограни-

вает цикличность применения установки одним циклом. Поэтому, наряду с разработкой импульсных источников электромагнитного излучения, использующих принципы магнитной кумуляции, необходимо сформулировать подходы к получению сверхсильного магнитного поля, путем управляемого изменения эффективной магнитной связи и распределения тока в обмотке магнитокумулятивного генератора [5].

Постановка задачи

Рассмотрим электродинамическую модель плазменно-управляемого дросселя с катушкой Биттера, управляемой радиально-импульсной плазменной системой, структурная схема которой приведена на рис. 3, включающую в себя внутреннюю проводящую перфорированную тонкостенную трубку (1), выполненную из сплава CuCrZr, расположенную соосно, с фиксированным зазором (2), внутри спиральной дисковой катушки (3). Правый торец трубки (4) имеет электрическое соединение с правым выводом катушки, через контур вытеснения на нагрузку сжимаемого магнитного потока, расположенный в (4), левый торец трубки и левый вывод катушки подключены к источнику тока - батарее конденсаторов (5). Газ (Ar, He, или смесь Ar–H₂) подаётся в полость трубки через коллектор (6), расположенный у левого торца, ионизируется дуговым разрядником (7), расположенным коаксиально, внутри перфорированной трубки, и выходит через перфорацию радиально, заполняя зазор между трубкой и витками катушки.

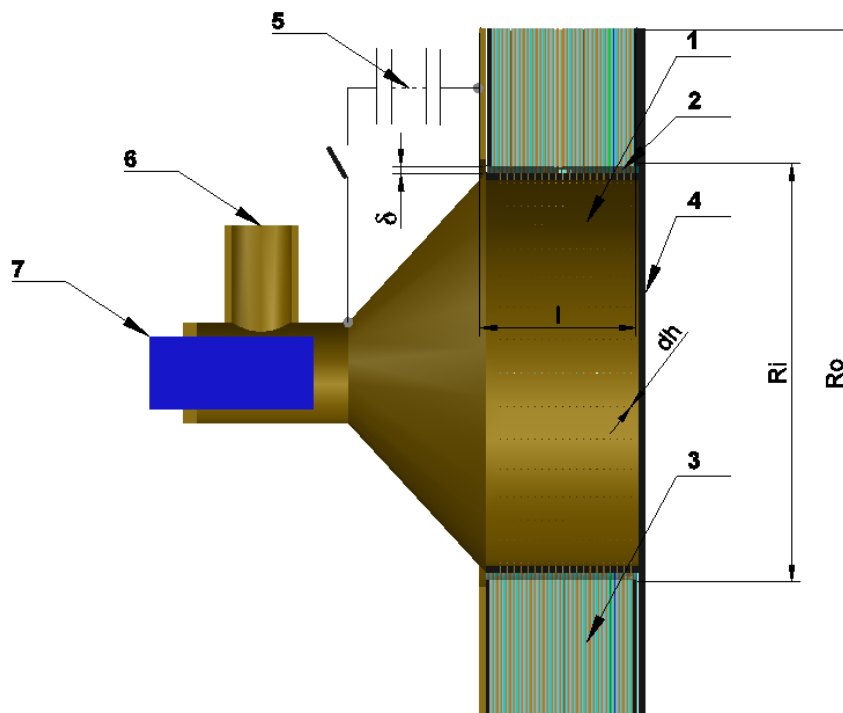


Рис. 3. Структурная схема плазменно-управляемого дросселя с катушкой Биттера, управляемой радиально-импульсной плазменной системой

Для формальной постановки и решения задачи в работе введены обозначения, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Обозначения

Обозначение	Физический смысл обозначения
R_i	– внутренний радиус катушки
R_0	– внешний радиус катушки
R_t	– радиус перфорированной тонкостенной трубки
L_B	– индуктивность катушки
L_{tube}	– индуктивность прямого цилиндрического проводника
L_{total}	– общая индуктивность цепи
M_{B-tube}	– взаимная индуктивность системы катушка – цилиндрический проводник
l	– длина катушки
N	– число спиральных витков
I_p	– ток между цилиндрическим проводником и катушкой при вводе плазмы
z	– осевая длина активной зоны
V_B	– потенциал катушки
V_{tube}	– потенциал цилиндрического проводника
I_B	– ток через катушку
I_{tube}	– ток через цилиндрический проводник
δ	– радиальный зазор между трубкой и нижней поверхностью катушки
d_h	– диаметр перфорационных отверстий
n_h	– линейная плотность отверстий (отв./м)
A_h	– площадь одного отверстия

Следует учесть, что в катушке Биттера ток течёт радиально-спирально (от центра к краю или наоборот), но для магнитного поля в первом приближении система эквивалентна соленоиду с тем же N и средним радиусом:

$$R = (R_i + R_0)/2.$$

Для квазистационарного приближения (низкие частоты, $f \ll c/l$), выражение для общей индуктивности цепи примет вид:

$$L_{total} = L_B + L_{tube} + 2M_{B-tube}, \quad (1)$$

где: $L_B = (\mu_0 N^2 \pi R^2)/l$ – индуктивность первого контура (катушки), $L_{tube} \approx \mu_0 l \cdot (\ln(2l/R_t) - 1)/2\pi$ – индуктивность второго контура (прямого цилиндрического проводника длиной l , радиусом R_t), M_{B-tube} – взаимная индуктивность системы катушка – проводящая трубка (токи направлены в противоположные стороны).

Знак M_{B-tube} зависит от согласования направлений токов: если токи создают суммирующиеся магнитные потоки – $M_{B-tube} > 0$, если встречные – $M_{B-tube} < 0$.

В рассматриваемой схеме, ток в катушке закручивается по спирали (допустим, по часовой стрелке, если смотреть со стороны положительного вывода), и создаёт магнитное поле вдоль оси влево (правило буравчика). Ток в трубке течёт по оси, в обратную сторону (от правого торца к левому), и, поскольку

траектория проводника прямая, а не спиральная, он не создаёт продольного поля внутри себя, но его возвратный путь по сравнению с витками катушки образует контур с встречно направленным вкладом в осевой поток, как следствие магнитные потоки частично компенсируются, поэтому взаимная индуктивность M_{B-tube} отрицательна: $M_{B-tube} = -|M_{B-tube}|$. Пусть трубка – длинный тонкостенный проводник, по которому течёт ток I_0 . Рассмотрим один виток катушки радиусом R_t , охватывающий трубку. По аналогии с соленоидом, магнитное поле внутри длинного соленоида длиной l , с током I и одним витком: $B = \mu_0 I/l$, магнитный поток (через площадь πR_t^2): $\Phi = B\pi R_t^2 = \mu_0 I\pi R_t^2/l$, взаимная индуктивность одного витка и осевого проводника: $M_1 = \Phi/I = \mu_0 \pi R_t^2/l$, потокосцепление одного витка с током в трубке: $\Psi = M_1 I_0$.

Теперь рассмотрим N витков, каждый из которых оказывает влияние на ток в трубке, при этом направление тока в трубке противоположно тому, как если бы она была $N+1$ витком. Если бы трубка несла ток в том же направлении, что и витки (например, была бы продолжением катушки), то суммарная индуктивность была бы $\approx (N+1)^2$, но поскольку ток в трубке идёт навстречу, её вклад вычитает два виртуальных витка.

Для коаксиальной системы с зазором δ , взаимная индуктивность системы катушка – проводящая трубка:

$$M_{B-tube} \approx -\mu_0 N\pi R_t^2/l, \text{ при } \delta \ll R_t. \quad (2)$$

Тогда приближённое выражение для общей индуктивности рассматриваемой цепи в отсутствие плазмы, при условии, что катушка и проводящая трубка соединены последовательно, принимает вид:

$$L_{total} \approx \mu_0 N\pi R_t^2/l \cdot (N - 2) + L_{tube}. \quad (3)$$

Физический смысл множителя $(N - 2)$ заключается в том, что трубка заменяет один возможный виток, и ток в ней течёт встречно, т.е. она действует как антивиток.

Рассмотрим распределенную проводимость зазора между трубкой и витками катушки при введении плазмы. Пусть плазма характеризуется локальной объёмной проводимостью $\sigma(z, t)$ в зазоре. Ток перетока через элемент dz описывается законом Ома для плазмы:

$$dI_p(z) = G(z) \cdot [V_B(z) - V_{tube}(z)], \quad (4)$$

где: $G(z) = \sigma(z)S_{эфф}/\delta$ – локальная проводимость зазора, $S_{эфф} = 2\pi R_t \cdot dz$ – эффективная площадь контакта на элементе dz , $V_B(z)$, $V_{tube}(z)$ – потенциалы спирали и трубки.

Пусть полный ток источника $I_0(t)$ неизменен. Тогда:

$$\begin{aligned} dI_B(z)/dz &= -G(z) \cdot [V_B(z) - V_{tube}(z)]; \\ dI_{tube}(z)/dz &= G(z) \cdot [V_B(z) - V_{tube}(z)]. \end{aligned} \quad (5)$$

Потенциалы связаны с токами через омические и индуктивные падения:

$$\begin{aligned} V_B(z) &= -\int_0^z [R_B' I_B(\zeta) + L_B' \partial I_B(\zeta)/\partial t] d\zeta; \\ V_{tube}(z) &= \int_z^l [R_{tube}' I_{tube}(\zeta) + L_{tube}' \partial I_{tube}(\zeta)/\partial t] d\zeta, \end{aligned} \quad (6)$$

где: $R' = R/l$, $L' = L/l$ – удельные параметры.

Энергетический подход для оценки эффективной индуктивности дросселя

Выполним переход от локальных распределённых токов к макроскопической, измеримой величине – индуктивности дросселя как двухполюсника, которую можно определить экспериментально, а также использовать в синтезе схемотехнических решений магнитокумулятивного генератора многоразового использования.

Рассматриваемая модель реального индуктивного элемента, выполненного на базе катушки Биттера с центральной тонкостенной перфорированной трубкой, не позволяет использовать известные N и I_0 для прямого вычисления индуктивности, $L=\Phi/I$. вследствие отсутствия единого «витка» с током I_0 , а также единого магнитного потока Φ через «площадь витка»:

- ток в катушке неоднороден по длине: $I_B(z)$ уменьшается от левого конца к правому из-за утечек через плазму;
- ток в трубке также неоднороден: $I_{tube}(z)$ нарастает от левого торца к правому;
- токи $I_B(z)$, $I_{tube}(z)$ направлены встречно, и их магнитные поля частично компенсируют друг друга;
- геометрия системы – не идеальный соленоид, а совокупность катушки Биттера и тонкостенной трубки.

Исходя из того, что индуктивность представляет собой коэффициент, связывающий ток через двухполюсник и магнитную энергию, запасённую в его окрестности, можно сделать вывод, что согласно закону сохранения энергии, определение эффективной индуктивности устройства, как двухполюсника, возможно через магнитную энергию, запасённую в поле. Используем энергетический подход для оценки эффективной индуктивности. Магнитная энергия системы:

$$W_m = 1/2 \cdot \int_0^l [L_b' I_b^2(z) + L_{tube}' I_{tube}^2(z) + 2M'(z) I_b(z) I_{tube}(z)] dz, \quad (7)$$

тогда, эффективная индуктивность определяется как:

$$L_{eff}(t) = 2W_m(t)/I_0^2. \quad (8)$$

Чем больше $I_p(z)$, тем ближе $I_B(z) \rightarrow 0$ и $I_{tube}(z) \rightarrow I_0$, но с противоположным направлением локального вклада в поле, следовательно – $W_m \downarrow$, $L_{eff} \downarrow$.

Плазмозфизическая модель плазменно- управляемого дросселя

Рассмотрим плазмозфизическую модель плазменно-управляемого дросселя с катушкой Биттера и радиально-импульсной плазменной системой. Для формирования плазмы, газ вытесняется из отверстий перфорированной трубки со скоростью v_g , определяемой перепадом давления Δp :

$$v_g = (2\Delta p/\rho_g)^{1/2}, \quad \rho_g = pM/RT; \quad (9)$$

плотность струи на выходе:

$$n_g = \dot{m}/A_n n_{H\mu} m_u v_g, \quad \dot{m} = C_d A_{кол} (2\rho_g \Delta p)^{1/2}, \quad (10)$$

где: C_d – коэффициент расхода, $A_{кол}$ – сечение коллектора.

Внутренний высокочастотный (ВЧ) плазмотрон, мощностью P_{RF} , ионизирует газ. В стационарном режиме:

$$\alpha n_e \cdot n_g = \beta n_e^2 + \nu_{diff} n_e, \quad (11)$$

где: α – коэффициент ионизации, зависящий от E/N , E – высокочастотное поле, N – плотность газа, β – коэффициент объёмной рекомбинации, $\nu_{diff} \sim D/\delta^2$ – частота диффузионных потерь (D – коэффициент диффузии).

В приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР), при $T_e \sim 1-2$ эВ:

$$\sigma = n_e e^2 / m_e \nu_m, \nu_m \approx 5,5 \cdot 10^{-10} n_g T_e^{-3/2}, \quad (12)$$

тогда проводимость:

$$\sigma \approx 1,92 \cdot 10^4 \cdot T_e^{3/2} \cdot n_e / (n_g \ln \Lambda), \quad (13)$$

где: $\ln \Lambda \approx 10$ – кулоновский логарифм. При $T_e = 1.5$ эВ, $n_e/n_g = 10^{-3}$, получаем для заполнения зазора Ag, при давлении $p=10$ кПа, $\sigma \approx 300$ [Ом⁻¹·м⁻¹].

Учет влияния перфорации трубки на распределение плазмы

Рассмотрим влияние перфорации на распределение плазмы. Плотность ионов в зазоре зависит от z из-за истечения газа:

$$n_g(z) = n_{g0} \exp \left(- \int_0^z n_h(\zeta) A_h (v_g/v_{gap}) d\zeta \right), \quad (14)$$

где: $v_{gap} = 2\pi R_t \delta \cdot dz$ – объём элемента зазора.

Следовательно, можно профилировать $n_h(z)$, например, увеличивать плотность отверстий к правому концу, чтобы добиться равномерного $\sigma(z)$ и, следовательно, равномерного шунтирования. Также, в случае с реализацией магнитокумулятивного генератора, возможно увеличение диаметра для левого (по схеме) ряда отверстий, что обеспечит требуемое для запираания магнитного потока шунтирование катушки в момент поджига плазмы.

Динамическая модель плазменно- управляемого дросселя

Рассмотрим динамическую модель плазменно-управляемого дросселя с катушкой Биттера и радиально-импульсной плазменной системой, для оценки переходных процессов в системе. Пусть источник – импульсный:

$$I_0(t) = I_{max} \cdot \sin^2 (\pi t/\tau), \tau = 1 \dots 10 \text{мс},$$

тогда уравнение цепи:

$$U(t) = d/dt [L_{eff}(t)I_0(t)] + R_{tot}I_0(t). \quad (15)$$

Самосогласованная система:

$$\begin{aligned} L_{eff} &= F[\sigma(t)]; \\ \sigma(t) &= g[P_{RF}, p(t), n_g(z), T_e(t)]; \\ T_e(t), n_e(t) &\text{ – из уравнения баланса энергии.} \end{aligned} \quad (16)$$

Упрощённая модель с задержкой:

$$d\sigma/dt = 1/\tau_{ion} \cdot (\sigma_{\infty}(P_{RF}, p) - \sigma), \tau_{ion} \sim 1 \dots 100 \mu\text{с}, \quad (17)$$

тогда:

$$dL_{eff}/dt = dL/d\sigma \cdot d\sigma/dt = -k_{\sigma}(\sigma_{\infty} - \sigma)/\tau_{ion}. \quad (18)$$

Выводы

Приведена структурная схема плазменно-управляемого дросселя, представляющего собой импульсный источник электромагнитного излучения магнитокумулятивного генератора многократного применения, предназначенный для подавления и вывода из строя электронных устройств. В рассматриваемой электродинамической модели индуктивного элемента (1)-(3), сформулированы соотношения (4)-(6), для распределенной проводимости зазора между трубкой и витками катушки при введении плазмы. Выполнена оценка макроскопической, измеримой величины – эффективной индуктивности дросселя как двухполюсника (8), через использование энергетического подхода. Рассмотрена плазмозфизическая модель плазменно-управляемого дросселя с катушкой Биттера и радиально-импульсной плазменной системой (9)-(13), с учетом влияния перфорации трубки на распределение плазмы (14). Для оценки переходных процессов в системе приведена динамическая модель плазменно-управляемого дросселя с катушкой Биттера и радиально-импульсной плазменной системой (15)-(18).

Представленный в работе подход к управляемому изменению эффективной магнитной связи и распределения тока в обмотке через введение проводящей плазмы в зазор между обмоткой и проводящим или полупроводящим экраном, позволяет решить проблему многократного использования магнитокумулятивного генератора. Использование принципов магнитной кумуляции с индуктивным элементом многократного действия, дает возможность синтеза облика компактных систем дистанционного электромагнитного воздействия на элементы электронной компонентной базы, с целью частичного, либо полного нарушения работоспособности последних.

Дальнейшие исследования целесообразно ориентировать на синтез электродинамической модели системы вытеснения на нагрузку сжимаемого магнитного потока и проектирование облика системы магнитокумулятивной генерации мощных электромагнитных импульсов многократного действия.

Литература

1. Егурнов В. О., Ильин В. В., Некрасов М. И., Сосунов В. Г. Анализ способов противодействия беспилотным летательным аппаратам для обеспечения безопасности защищаемых объектов // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 115–116. С. 51–58.
2. Николаев Н. В., Ильин В. В., Некрасов М. И. Актуальные вопросы противодействия современным автономным беспилотным летательным аппаратам и FPV-дронам // Вопросы безопасности. 2024. № 1. С. 40–60.
3. Макаренко С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам. – СПб.: Научное издание, 2020. – 204 с.
4. Гриневич Б. Е., Демидов В. А., Ивановский А. В., Селемир В. Д. Взрывоманитные генераторы энергии и их применение в научных экспериментах // Успехи физических наук. 2011. Т. 181. № 4. С. 422–427.

5. Велихов Е. П., Афонин А. Г., Бутов В. Г., Панченко В. П., Синяев С. В., Солоненко В. А., Швецов Г. А., Якушев А. А. Импульсный МГД-генератор нового поколения // Доклады Академии наук. 2019. Т. 486. № 2. С. 178–183.

6. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – М.: Наука, 1971. – 969 с.

7. Крячко А. Ф. Вычисление электромагнитного рассеяния на нескольких тонких проводниках // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Сборник тезисов докладов II Международного форума, Санкт-Петербург, 09 ноября 2022 года. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. 2022. – С. 220–223.

References

1. Egurnov V. O., Ilyin V. V., Nekrasov M. I., Sosunov V. G. Unmanned Aerial Vehicles Countermeasures to Ensure the Protected Sites Safety Analysis. *Enginery Problems. Series 16. Anti-Terrorist Engineering Means*, 2018, no. 115–116, pp. 51–58 (in Russian).

2. Nikolaev N. V., Il'in V. V., Nekrasov M. I. Topical Issues of Countering Modern Autonomous Unmanned Aerial Vehicles and FPV Drones. *Security Issues*, 2024, no. 1, pp. 40–60 (in Russian).

3. Makarenko S. I. *Protivodeistvie bespilotnim letatel'nyim apparatam* [Counter Unmanned Aerial Vehicles]. Saint-Petersburg, Naukoemkie tekhnologii, 2020. 204 p. (in Russian).

4. Grinevich B. E., Demidov V. A., Ivanovsky A. V., Selemir V. D. Explosive Magnetic Generators and their Application in Scientific Experiments. *Physics-Uspekhi*, 2011, vol. 54, no. 4, pp. 403–408 (in Russian).

5. Velikhov E. P., Afonin A. G., Butov V. G., Sinyaev S. V., Solonenko V. A., Panchenko V. P., Yakushev A. A., Shvetsov G. A. A New Generation Pulsed MHD Generator. *Doklady Physics*, 2019, vol. 64, no 5, pp. 238–243 (in Russian).

6. Gradshtein I. S., Ryzhik I. M. *Tablitsi integralov, summ, ryadov i proizvedenii* [Tables of integrals, sums, series and works]. Moscow, Nauka, 1971. 969 p. (in Russian).

7. Kryachko A. F. Computation of Electromagnetic Scattering on Multiple Thin Conductors. // *Matematicheskiye metody i modeli v vysokotekhnologichnom proizvodstve : Sbornik tezisov dokladov: II Mezhdunarodnogo foruma, Sankt-Peterburg, 09 November 2022* [Mathematical methods and models in high-tech production: II International Forum. Sat. abstracts of reports]. Saint-Petersburg, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 2022. pp. 220–223 (in Russian).

Статья поступила 20 февраля 2026 г.

Информация об авторах

Гришин Федор Александрович – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Заместитель главного конструктора ОКБ 159. ОАО «Маши-

ностроительный завод «Арсенал». Область научных интересов: прикладная электродинамика, телекоммуникации. E-mail: fealgr@list.ru

Адрес: 195009, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Комсомола, д. 1–3

Крячко Александр Федотович – доктор технических наук, профессор. Заведующий кафедрой радиотехнических и оптоэлектронных комплексов. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов: прикладная электродинамика, телекоммуникации, теория сигналов. E-mail: alex_k34.ru@mail.ru

Адрес: 197000, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

Approaches to obtaining an ultra-strong magnetic field by controlling changes in the effective magnetic coupling and current distribution in the winding of a magnetic accumulator generator

F. A. Grishin, A. F. Kryachko

Purpose: *Problem statement: the presence of a wide range of radio-electronic systems among the opposing parties creates the need to equip protected objects and mobile groups with countermeasures that solve the tasks of suppressing and disabling the electronic component base, which is part of unmanned systems, communication systems, actuators, data collection and control systems. The development of electrodynamic suppression systems based on pulsed electromagnetic radiation sources, as an alternative to kinetic suppression, involves the use of the principles of magnetocumulative generation, which explains the great interest in the synthesis of an electrodynamic model of a multi-acting magnetocumulative generator, as well as the design of an inductive element and methods for controlled change of effective magnetic coupling. Objective: to develop an electrodynamic model of a plasma-controlled choke with a Bitter coil and a radial pulse plasma system that controls an inductive element that implements the principles of magnetic energy accumulation. Methods used: mathematical analysis methods, constructive analysis, approximation theory, optimization methods, mathematical and computer modeling are used to solve the problem. Novelty: the novelty elements of the presented solution are the use of a method for controlling the inductance of a coil, which is an integral part of a magnetic storage generator, which, unlike the known ones, is based on a non-destructive plasma effect on an inductive element, which made it possible to abandon the use of explosion energy to deform a cylindrical conductive liner used in a second type magnetic storage generator (MCG-2). A method is proposed for a controlled change in the effective magnetic coupling and current distribution in the winding of an inductive element by introducing a conductive plasma into the gap between the winding and a conductive or semi-conducting shield. The use of an inductive element made according to the Bitter scheme is proposed and justified, unlike coils made by wire winding (MCG-1) or spiral milling (MCG-2), which made it possible to increase the mechanical and electrical strength of the coil, effectively dissipate heat, and counteract the pondemotor forces that occur when a pulse is passed. current through the coil. Practical significance: the use of the principles of magnetic cumulation with a multiple-acting inductive element makes it possible to synthesize the appearance of compact systems of remote electromagnetic action on electronic devices, commercial drones, communications equipment and electronic component base elements, with the aim of partially or completely disrupting the operability of the latter. It is shown that the developed method of controllably changing the effective magnetic coupling and current distribution in the winding through the introduction of a conductive plasma into the gap between the winding and a conductive or semi-conducting shield solves the problem of repeated use of a magnetic accumulator generator. Directions for further development of the work: the considered approach will be of interest to specialists in the field of radio engineering, when studying problems of applied electrodynamics, designing and optimizing systems for generating powerful electromagnetic pulses.*

Key words: conductive liner, electromagnetic wave, inductive element, magnetic cumulation, magnetic storage generation, radial pulse plasma system.

Information about Authors

Fedor Aleksandrovich Grishin – Doctoral Student. Deputy Chief Designer of OKB 159. JSC "Arsenal Machine-building Plant". Field of Research: applied electrodynamics, telecommunications. E-mail: fealgr@list.ru

Address: 195009, Russia, Saint-Petersburg, Komsomola str., 1–3.

Alexander Fedotovitch Kryachko – Dr. habil. of Engineering Sciences, Full Professor. Head of the Department of Radio Engineering and Optoelectronic Complexes. St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. Field of Research: applied electrodynamics, telecommunications, signals theory. E-mail: alex_k34.ru@mail.ru

Address: 197000, Russia, Saint-Petersburg, Bolshaya Morskaya str., 67, lit. A.