

ЛИТЕРАТУРА

1. Phillips O. M. The prospects for magnetohydrodynamic ship propulsion.— J. Ship Research, 1962, vol. 5, N 4.
2. Яковлев В. И. К теории индукционного МГД-двигателя со свободным полем.— ДАН СССР, 1979, т. 249, № 6; ПМТФ, 1980, № 3.

УДК 538.4 : 621.31

ПИТАНИЕ ИНДУКТИВНЫХ И ОМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК МАГНИТОКУМУЛЯТИВНОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОМОЩЬЮ ТРАНСФОРМАТОРА

*А. С. Кравченко, Р. Э. Людаев, А. И. Павловский,
Л. Н. Пляшкевич, А. М. Шувалов*

(Москва)

Магнитокумулятивные (или взрывомагнитные) генераторы перспективны в качестве мощных импульсных источников электрической энергии [1—3]. При непосредственном включении нагрузки в цепь магнитокумулятивного генератора (МКГ) эффективная работа МКГ возможна лишь при наложении ограничений на величину индуктивности и сопротивления нагрузки, в то же время во многих областях применений параметры нагрузки значительно превышают конечную индуктивность и сопротивление МКГ, а требуемое время ввода энергии в нагрузку может существенно отличаться от времени работы генератора. Одним из способов согласования параметров МКГ и нагрузки является применение повышающего трансформатора [1]. В работах [3—7] описывается ряд конструкций МКГ с трансформатором, рассматриваются вопросы согласования МКГ с омическими и индуктивными нагрузками. Ряд применений трансформаторных МКГ в физических исследованиях обсуждается в [8—10].

В данной работе рассматриваются варианты трансформаторного отвода энергии от МКГ к индуктивным и омическим нагрузкам. Для инженерных расчетов трансформаторных МКГ оказывается полезной электротехническая модель, дополненная известным из эксперимента фактом существования оптимальной по энергии конечной индуктивности генератора.

1. Согласно электротехнической модели, работа МКГ описывается последовательным RL -контуром с переменными индуктивностью L и сопротивлением R , формально включающим все потери магнитного потока Φ .

Тогда $I = \Phi\Phi_0/L$, где I — ток в генераторе, $\Phi = \exp\left(-\int_0^t \frac{R}{L} dt\right)$,

индексы 0 и f обозначают значения величин соответственно в начале и в конце работы МКГ. При условии $|dL/dt| > R$ возрастает I , если $|dL/dt| > 2R$, возрастает магнитная энергия W . Если при соблюдении этих условий $L_f \rightarrow 0$, то $I_f \rightarrow \infty$, что не имеет физического смысла, в данном случае задача выходит за рамки электротехнической модели. На практике для каждого генератора существует свое минимально допустимое значение L_f .

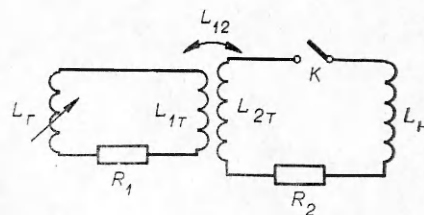
Эквивалентная электротехническая схема МКГ с трансформатором, нагруженным на сопротивление R_n и индуктивность L_n , изображенная на фиг. 1, при замкнутом ключе K и постоянных L_2 и R_2 описывается системой уравнений:

$$(1.1) \quad d(L_1 I_1)/dt + R_1 I_1 + L_{12} dI_2/dt = 0;$$

$$(1.2) \quad L_2 dI_2/dt + R_2 I_2 + L_{12} dI_1/dt = 0,$$

где $L_1 = L_r + L_{1r}$; L_r — рабочая индуктивность МКГ; L_{1r} — индуктивность первичной обмотки трансформатора, включающая L_n — индук-

тивность токопровода от МКГ к трансформатору; $L_2 = L_H + L_{2T}$; L_{2T} — индуктивность вторичной обмотки трансформатора; $L_{12} = k(L_{1T}L_{2T})^{-1/2}$; L_{12} — взаимоиנדукция; k — коэффициент связи трансформатора с учетом L_{1T} ; R_1, R_2 — сопротивления контуров; R_H входит в R_2 .



Ф и г. 1

Если $R_2 = 0$, из (1.1), (1.2) следует

$$I_1 = \varphi_0 \Phi_0 / L_0, \quad I_2 = -I_1 L_{12} / L_2 + I_{10} L_{12} / L_0 + I_{20},$$

где

$$L_0 = L_1 - L_{12}^2 / L_2; \quad \Phi_0 = I_{10} (L_0 - L_{12}^2 / L_2); \quad \varphi_0 = \exp \left(- \int_0^t \frac{R_1}{L_2} dt \right);$$

L_0, I_{10}, I_{20} — начальные значения L_1, I_1, I_2 . В этом случае влияние вторичной цепи сводится к уменьшению L_1 до L_0 , МКГ оказывается нагруженным не на $L_{1f} = L_{1T}$, а на L_{0f} . В случае внемодельного оптимума это позволяет для выбора L_{0f} воспользоваться экспериментальными данными исследования работы конкретных МКГ в зависимости от величины конечной индуктивности. Магнитная энергия в нагрузке $W_m = \psi W$, где W — полная магнитная энергия МКГ, $\psi = L_H L_{12}^2 / [L_2 (L_1 L_2 - L_{12}^2)]$.

При $k = 1$ $\psi_f = 1 / (1 + \alpha) < 1$, если $\alpha = L_H / L_{2T} \neq 0$, т. е. даже трансформатор с идеальной связью не позволяет передать всю энергию генератора в индуктивную нагрузку, $\psi_f \rightarrow 1$ при $\alpha \rightarrow 0$, но тогда $L_{0f} = L_{1T} (1 - \psi_f) \rightarrow 0$ и может стать меньше оптимального значения конечной индуктивности МКГ.

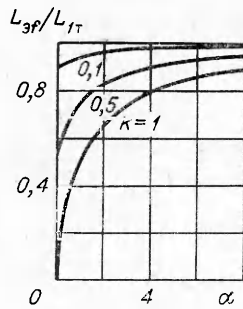
При $k \neq 1$ $L_{0f} = L_{1T} [1 - k^2 / (1 + \alpha)]$, зависимости L_{0f} / L_{1T} от α при различных k представлены на фиг. 2. Величина ψ_f максимальна при $L_{0f} / L_{1T} = (1 - k^2)^{1/2}$.

Если и $R_1 = 0$, конечная энергия МКГ и нагрузки определяется безразмерными параметрами k, α, l :

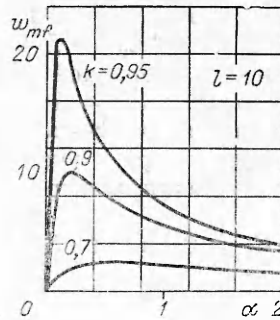
$$w_f = \frac{l(1 + \alpha) - k^2}{1 + \alpha - k^2}, \quad w_{mf} = \frac{\alpha k^2}{(1 + \alpha - k^2)^2} \left(l - \frac{k^2}{1 + \alpha} \right),$$

где $l = L_0 / L_{1T}$; $w_f = W_f / W_0$; $w_{mf} = W_{mf} / W_0$. На фиг. 3 представлены зависимости w_{mf} от α при различных k для $l = 10$. В максимуме w_{mf} $L_{0f} / L_{1T} = (1 - k^2) / (1 - k^2 / 2)$, $\alpha = 1 - k^2$. При $R_1 \neq 0$ положение максимума определяется характером затухания магнитного потока. Например, в случае $L_1 = L_0(1 - at)$, где a — положительная постоянная с размерностью s^{-1} , что характерно для коаксиальных МКГ, а также МКГ со спиральями постоянного шага и постоянного R_1 , w_{mf} имеет максимум при $\alpha = [\sqrt{\mu^2 k^4 + 4(1 - k^2)} - \mu k^2] / 2$, где $\mu = 1 + 2R_1 / (dL_1 / dt)$. Это справедливо и для экспоненциально уменьшающейся индуктивности $L_1 = L_0 e^{-at}$, что приблизительно описывает вывод индуктивности в спиральных переменного шага и постоянного отношения L_1 / R_1 .

При фиксированном L_{2T} необходимое α достигается подбором L_H . При выборе же трансформатора для определенного значения L_H требуемое α может быть обеспечено как за счет L_{1T} , так и L_{12} , т. е. выбором количества витков вторичной обмотки. Если обеспечить конструктивно постоянную величину k (что не всегда возможно), для максимального ψ_f необходимо выбрать $L_{12} = k \sqrt{L_{1T} L_H (1 - k^2)}$, для максимума w_{mf} (при $R_1 = 0$) $L_{12} = k [L_{1T} L_H (1 - k^2)]^{1/2}$. Соотношение между L_{12} и L_{1T} определяется конструкцией трансформатора. Если, например, $L_{1T} = L_{12} / (k N)$,



Ф и г. 2



Ф и г. 3

где N — количество витков вторичной обмотки, то при фиксированных L_{1T} и k для максимума ψ_f необходимо, чтобы $N = (L_H/L_{1T})^{1/2}(1 - k^2)^{1/4}$, при фиксированных N и k , чтобы $L_{1T} = L_H/[N^2(1 - k^2)^{1/2}]$.

2. Для иллюстрации влияния R_2 рассмотрим решение (1.1), (1.2) при $R_1 = 0$, $I_{20} = 0$, т. е. ключ K замыкается в начале работы МКГ. Для равномерного и экспоненциального законов вывода L_1 в этом случае (1.1), (1.2) решаются в квадратурах. Так, для второго случая можно написать

$$i_2 = l(1 + \alpha) [l(1 + \alpha) - k^2 e^{at}]^{\nu-1} e^{-at} \int_1^z \left[\frac{z}{l(1 + \alpha) - k^2 z} \right]^{\nu} dz,$$

конечное значение

$$i_{2f} = (1 + \alpha) (1 + \alpha - k^2)^{\nu-1} \int_1^l \left[\frac{z}{l(1 + \alpha) - k^2 z} \right]^{\nu} dz,$$

где

$$i_1 = I_1/I_{10}; \quad i_2 = -I_2 L_2 / (L_{12} I_{10}); \quad z = L_0/L_1 = e^{at};$$

$\nu = R_2/(aL_2)$. Аналогичные выражения можно получить и для равномерного вывода L_1 . Конечные значения энергетических коэффициентов для обоих случаев определяются соотношениями:

$$w_{mf} = \frac{\alpha k^2 i_{2f}^2}{l(1 + \alpha)^2}, \quad \psi_f = \frac{\alpha k^2 i_{2f}^2}{l^2(1 + \alpha)^2 + k^2(1 + \alpha - k^2) i_{2f}^2},$$

$$w_{qf}(\text{равномерный вывод}) = \frac{2\nu k^2}{l(1 + \alpha)} \int_1^l \frac{i_2^2 dz}{z^2}, \quad w_{qf}(\text{экспонента}) = \frac{2\nu k^2}{l(1 + \alpha)} \int_1^l \frac{i_2^2 dz}{z},$$

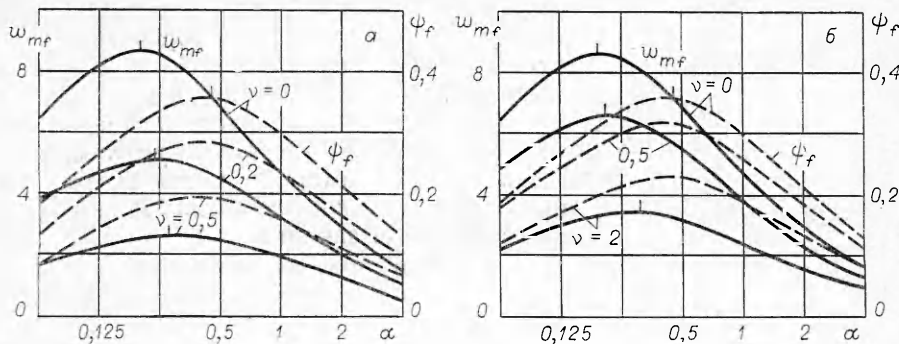
где $w_{qf} = W_{qf}/W_0$; W_{qf} — энергия, выделившаяся на R_2 за время T цикла работы МКГ. В нагрузке R_H выделяется энергия $W_{qf} R_H/R_2$. Таким образом, задача определяется безразмерными параметрами k , l , α , ν .

На фиг. 4 представлены зависимости w_{mf} и ψ_f от α при различных ν для обоих случаев, рассчитанные для $l = 10$, $k = 0,9$; оба случая различаются по характеру влияния α и ν на максимум кривой ($L_1 = L_0 e^{-at} - a$, $L_1 = L_0(1 - at) - b$).

На фиг. 5 представлены зависимости w_{qf} от ν при различных α для $l = 10$, $k = 0,95$ (сплошные линии — $L_1 = L_0 e^{-at}$, штриховые — $L_1 = L_0(1 - at)$).

При условии $R_2 \ll (L_2/I_2)dI_2/dt$ (1.1), (1.2) допускают приближенное решение

$$I_1 \approx \Phi_0 \Phi_3 / L_3, \quad I_2 \approx -L_{12} I_1 / L_2,$$



Ф и г. 4

где $\varphi_0 = \exp\left(-\int_0^t \frac{R_0}{L_0} dt\right)$; $R_0 = R_1 + R_2 L_{12}^2 / L_2^2$.

Следует также упомянуть о возможности получить аналитическое решение (1.1), (1.2), если $L_1 = L_0 / (1 + at)$, $R_1 = 0$, хотя этот закон вывода индуктивности не очень характерен для МКГ.

3. Трансформатор позволяет также в некоторых пределах регулировать форму токового импульса в нагрузке. Максимальная мощность развивается обычно в конце работы МКГ. Способ [7], позволяющий обострить токовый фронт без использования разрыва контура, заключается в том, что сначала трансформатор работает с разомкнутой вторичной цепью в режиме холостого хода, ключ K замыкается только спустя время τ от начала работы МКГ. Тогда длительность фронта будет $T - \tau$ (если I_2 до конца работы МКГ возрастает). После замыкания ключа при $R_2 = 0$

$$I_1 = \frac{\Phi_0 \varphi_\tau \varphi_0 L_{1\tau}}{\varphi_{0\tau} L_{0\tau} L_0}, \quad I_2 = -\frac{\Phi_0 \varphi_\tau L_{12}}{L_{1\tau} L_2} \left(\frac{\varphi_0 L_{0\tau}}{\varphi_{0\tau} L_0} - 1 \right),$$

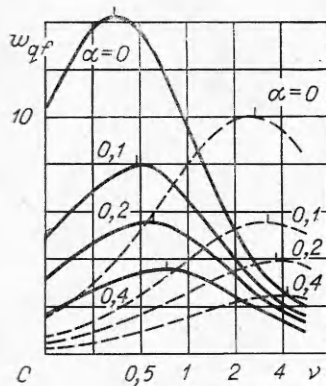
где индекс τ обозначает значение соответствующей величины в момент замыкания; dI_1/dt при замыкании возрастает скачком в $L_{1\tau} / L_{0\tau}$ раз.

С уменьшением $(T - \tau)$ падает W_{mf} . Обозначим через ε отношение W_{mf} в случае с замкнутой вторичной цепью к W_{mf} , полученной с замыканием ключа в момент τ , характеризующее степень использования энергии МКГ. Когда $R_1 = 0$, $\varepsilon = (1 - L_{1\tau} / L_{1\tau})^2$. При этом степень сокращения фронта $T / (T - \tau) = (l - 1)(\varepsilon^{-1/2} - 1)$ для равномерного вывода L_1 , при экспоненциальном выводе $T / (T - \tau) = -(\ln l) / [\ln(1 - \varepsilon^{-1/2})]$. Если $R_1 \neq 0$, то

$$\varepsilon = \left[\frac{\varphi_\tau}{L_{1\tau}} \left(\frac{L_{0\tau}}{\varphi_{0\tau}} - \frac{I_{0f}}{\varphi_{0f}} \right) \right]^2.$$

В индуктивной нагрузке такой способ позволяет сократить токовый фронт в 5—10 раз при приемлемой еще величине ε . Для этапа холостого хода трансформатора целесообразно иметь более высокую величину Φ_0 , поскольку по сравнению с работой с замкнутым ключом генератор будет работать в ненапряженном режиме. Если при этом в обоих случаях одинаковы W_0 , то ε увеличивается в $l(1 + \alpha) / [l(1 + \alpha) - k^2]$ раз, при одинаковых I_{10} — в $l^2(1 + \alpha)^2 / [l(1 + \alpha) - k^2]^2$. Для омической нагрузки обострение токового импульса обостряет импульс мощности.

При необходимости затянуть токовый импульс в омической нагрузке на время, превышающее T , последовательно с R_H можно включить накопительную индуктивность, увеличив L_H , чтобы при работе МКГ основная энергия запасалась в L_H , а затем выделялась на R_H с временем релакса-



Ф и г. 5

ции L_H/R_H . При этом разрушающийся по окончании работы МКГ трансформаторный узел шунтируется дополнительным замыкателем. В этом варианте МКГ фактически работает в режиме зарядки индуктивного накопителя. Высокая мощность МКГ отличает его от маломощных источников питания индуктивных накопителей, позволяя существенно снизить активные потери при зарядке.

Затухание токов по окончании работы МКГ описывается известными зависимостями индуктивно связанных RL -контуров, начальными условиями для которых будут I_{1f} и I_{2f} . Если трансформатор функционирует еще и в течение времени затухания, то в нагрузку может быть передана дополнительно часть энергии МКГ.

Если при работе МКГ влияние R_2 мало и вторичная цепь замкнута, $i_{2f} = i_{1f}$. Тогда при затухании токов

$$i_2 = i_{2f} [e^{\lambda_2 t} + (e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t}) \lambda_1 / (\lambda_1 - \lambda_2)],$$

где

$$\lambda_{1,2} = [-(\delta_1 + \delta_2) \pm \sqrt{(\delta_1 - \delta_2)^2 + 4\delta_1\delta_2 k^2 / (1 + \alpha)}] / [2 - 2k^2 / (1 + \alpha)];$$

$$\delta_1 = R_1 / L_{1T}; \quad \delta_2 = R_2 / L_2.$$

Спустя время $t_1 = \frac{\ln(\lambda_2/\lambda_1)}{\lambda_1 - \lambda_2}$ после окончания работы МКГ $i_2 = 0$, затем меняет знак, максимум i_2 обратного знака будет спустя время $t_2 = 2t_1$, затем i_2 релаксирует. Дополнительная энергия ΔW_q , выделяющаяся на сопротивлении R_2 при затухании токов в этом случае, дается соотношением

$$\frac{\Delta W_q}{W_f} = \frac{k^2}{(1 + \alpha)(1 + \delta_1/\delta_2)},$$

откуда следует необходимость условия $\delta_2 \gg \delta_1$. Это условие трудно обеспечить, когда требуется существенно затянуть токовый импульс. При варьировании α необходимо учитывать его влияние на этапе работы МКГ, если при этом можно пренебречь и R_1 , то

$$\frac{W_{qf} + \Delta W_q}{W_2} = \frac{k^2 [l(1 + \alpha) - k^2]}{(1 + \alpha)(1 + \alpha - k^2)(1 + \delta_1/\delta_2)}.$$

Если вторичная цепь замыкается в момент τ , то при малых R_1 и R_2 $i_{2f} = i_{1f} - i_{1\tau}$. С увеличением τ уменьшается i_{2f} , увеличивается амплитуда i_2 в обратной полуволне, ее максимум будет между t_1 и t_2 . Увеличивается и магнитный поток, захватываемый вторичной цепью в момент замыкания. При $\tau = T$ захватывается практически весь поток МКГ, $i_{2f} = 0$, существует только обратная токовая полуволна, максимум которой будет в момент t_1 , что и определяет продолжительность токового фронта. Поскольку в этом режиме вторичная цепь не влияет на работу МКГ, при любых R_1 и R_2

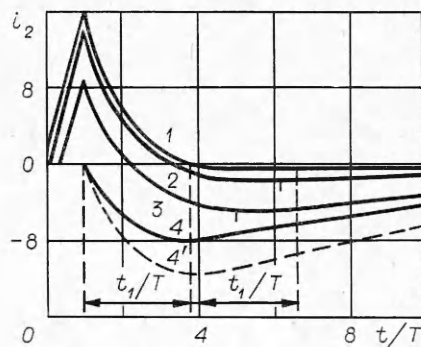
$$i_2 = \frac{i_{1f}\delta_1(1 + \alpha)}{(1 + \alpha - k^2)(\lambda_1 - \lambda_2)} (e^{\lambda_2 t} - e^{\lambda_1 t}),$$

$$\frac{\Delta W_q}{W_f} = \frac{k^2}{(1 + \alpha)(1 + \delta_2/\delta_1)}.$$

Если выбрать $\delta_2 \ll \delta_1$, это снизит W_f , поэтому рационально увеличивать δ_1 только после окончания работы МКГ, вводя, например, разрыв кон-

тура. Уменьшать δ_2 рациональнее не за счет α , а снижая R_2 за счет увеличения добротности вторичной обмотки трансформатора, хотя это и связано с увеличением габаритов трансформаторного узла.

На фиг. 6 приведены кривые i_2 , рассчитанные для равномерного вывода L_1 при $l = 10, k = 0,9, \alpha = 1, \delta_1 T = 0,5, \delta_2 T = 0,1$ без учета R_1 и R_2 при работе МКГ. Кривая 1 соответствует режиму с замкнутой вторичной цепью; 2 — для $\tau = 0$; 3 — для $\tau = 0,4T$; 4 — для $\tau = T$ (режим захвата потока).



Фиг. 6

В режиме захвата потока спустя время t_1 после замыкания энергии в L_H максимальна, причем

$$\frac{W_m}{W_f} = \frac{\alpha k \delta_1^2}{(1 + \alpha - k^2)^2 \lambda_1^2} \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^{2\lambda_2 / (\lambda_1 - \lambda_2)}$$

При $\delta_2 \ll \delta_1$

$$i_2 \approx -i_{1f} \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{\delta_1 (1 + \alpha) t}{1 + \alpha - k^2} \right] \right\}, \quad \frac{W_m}{W_f} \approx \frac{\alpha k^2}{(1 + \alpha)^2}$$

Если по окончании работы МКГ быстро увеличивать δ_1 , то при достаточно малом δ_2 можно, например, сформировать токовый импульс с коротким фронтом и длительным затуханием.

Целесообразно в режиме захвата потока величину L_{1T} выбирать равной оптимальной конечной индуктивности для данного МКГ, сохраняя те же l, k и α . Это обеспечивает тот же режим генератора, что и для замкнутой вторичной цепи, а максимальное значение i_2 возрастает (кривая 4' на фиг. 6).

Возможны также и другие варианты схем энергопитания индуктивных и омических нагрузок с использованием трансформаторных МКГ.

Поступила 5 VIII 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Людаев Р. З. и др. Магнитная кумуляция. — ДАН СССР, 1965, т. 165, № 1.
2. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
3. Биченков Е. И. Взрывные генераторы. — ДАН СССР, 1967, т. 174, № 4.
4. Cummings D. V. Cascading explosive generators with autotransformer coupling. — J. Appl. Phys., 1969, vol. 40, N 10.
5. Герасимов Л. С. Согласование взрывомагнитного генератора с индуктивной нагрузкой. — ЖТФ, 1974, т. 44, № 9; Герасимов Л. С. Согласование взрывомагнитного генератора с активной нагрузкой с помощью трансформатора. — ПМТФ, 1978, № 4.
6. Herlach F. Explosive-driven energy generators with transformer coupling. — J. Phys. E: Sci. Instrum., 1979, vol. 12, p. 421.
7. Павловский А. И., Людаев Р. З., Пляшкевич Л. Н., Гурин В. Е. Взрывомагнитный генератор. — Бюл. ОИПОТЭ, 1970, № 11.
8. Войтенко А. Е., Маточкин Е. П., Яблочников Б. А. Использование взрывомагнитного генератора для питания газового разряда. — ПТЭ, 1973, № 3.
9. Павловский А. И., Кулешов Г. Д. и др. Импульсный безжелезный бетатрон с питанием от магнитокумулятивного генератора. — Атомн. энергия, 1976, т. 41, № 2.
10. Павловский А. И. и др. Магнитокумулятивные генераторы с трансформаторным выводом энергии. Формирование и передача на расстояние электромагнитных импульсов магнитокумулятивных генераторов; Чернышев В. К., Давыдов В. А. Предельные возможности трансформаторного способа передачи энергии из взрывомагнитного генератора в индуктивный потребитель. — В кн.: Докл. на II Междунар. конф. по генерированию мегагауссовых магнитных полей. Вашингтон, 1979.