Литература

1. R.L.Conger, J.Appl.Phys, V38, N5, 1967, p ...
2. А.Д.Сахаров, У.Ф.Н., т. 88, № 4, 1966, 725
3. H.Kolm at all, High Magnetic Fields, 1962, New ...

Ответственный за выпуск Б.А.Яблочников
Подписано к печати 28.02.1969 г.
Усл. 0,6 печ.л., тираж 150 экз. Бесплатно.
Заказ № 281

Отпечатано на ротапринте в ИЯФ СО АН СССР.

6

ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР

препринт 281

Б.А.Яблочников

ПЕРЕДАЧА МОЩНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ ИЗ МК-ГЕНЕРАТОРА В АКТИВНУЮ НАГРУЗКУ

НОВОСИБИРСК
1969

ПЕРЕДАЧА МОЩНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ ИЗ МК-ГЕНЕРАТОРА В АКТИВНУЮ НАГРУЗКУ

Б.А.Яблочников

АННОТАЦИЯ

Исследуется влияние нелинейного во времени закона изменения индуктивности магнитнокумулятивного (МК) генератора на соотношение между коэффициентом изменения индуктивности и величиной энергии, переданной в активную нагрузку, подключенную к генератору без промежуточных элементов.

Принцип действия магнитнокумулятивного (МК) генератора основан на сжатии проводящим контуром предварительно созданного в нем магнитного потока. В данной работе будет рассмотрен случай использования МК-генератора в качестве источника энергии для питания постоянного активного сопротивления. Схема соединения элементов электрической цепи приведена на рис. 1, где МК-генератор представлен в виде переменной индуктивности.

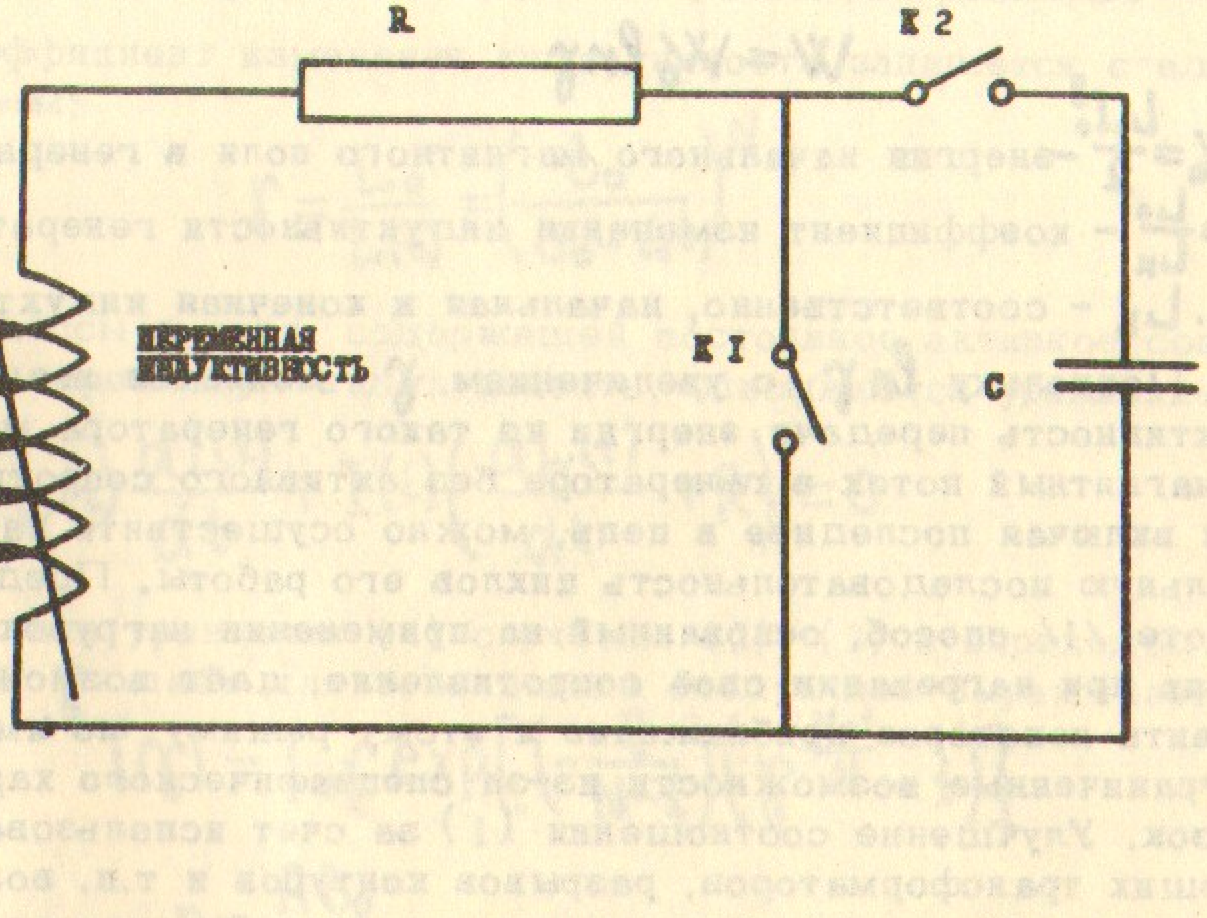

Рис. 1.

На сопротивление R и переменную индуктивность $L(t)$ В тот момент, когда последняя имеет свое максимальное значение L_0, разряжается конденсаторная батарея C при помощи ключа К2. Когда разрядный ток достигает своей максимальной величины, ключ К1 замыкается и индуктивность по действием внешних сил начинает уменьшаться. Производимая при этом работа в конечном счете идет на нагрев сопротивления R. Источником энергии внешних сил является взрывчатка.

Вопрос об использовании взрывного генератора для питания активных нагрузок до сих пор не имеет удовлетворительного решения. Наиболее широко для этих целей используется конструкция рассмотренная в работе /1/. Она представляет из себя соленоид, внутри которого коаксиально расположена металлическая труба, начиненная взрывчаткой. В процессе взрыва труба, расширяясь, закорачивает последовательно витки соленоида, уменьшая тем самым его индуктивность. Как показано в той же статье, в случае равномерной намотки соленоида, то-есть индуктивность со временем меняется линейно, при оптимальных параметрах генератора в нагрузке нельзя рассеять энергию, большую

$$W = W_0 \ln \gamma \qquad (1)$$

где $W_0 = \frac{L_0 I_0^2}{2}$ – энергия начального магнитного поля в генераторе,

$\gamma = \frac{L_0}{L_K}$ – коэффициент изменения индуктивности генератора,

L_0, L_K – соответственно, начальная и конечная индуктивности.

Поскольку $\ln \gamma$ с увеличением γ меняется незначительно, эффективность передачи энергии из такого генератора мала. Сжимая магнитный поток в генераторе без активного сопротивления, а затем включая последнее в цепь, можно осуществить наиболее рациональную последовательность циклов его работы. Предлагаемый в работе /1/ способ, основанный на применении нагрузок, увеличивающих при нагревании своё сопротивление, даёт возможность осуществить некоторое приближение к этому режиму, но имеет весьма ограниченные возможности из-за специафического характера нагрузок. Улучшение соотношения (1) за счет использования согласующих трансформаторов, разрывов контуров и т.п. возможно, но менее желательно, нежели подключение нагрузки непосредственно к выходу генератора.

Исследованию влияния нелинейной зависимости $L(t)$ генератора на эффективность передачи энергии в активную нагрузку уделено основное внимание в данной статье. Необходимо отметить, что нелинейный закон $L(t)$ использовался, из несколько иных соображений, в экспериментах по получению сильных токов, раб. /2/.

ТЕОРИЯ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ИЗ МК-ГЕНЕРАТОРА В АКТИВНУЮ НАГРУЗКУ

Закон изменения индуктивности во времени будет задаваться в виде степенной функции

$$L(t) = L_0 \left(1 - \frac{V_0}{b_0} t\right)^N \qquad (2)$$

где $N = \frac{m}{m-1}$ (m – положительное, целое > 1),

b_0 – характерный геометрический размер (рис.3),

V_0 – скорость изменения геометрического размера.

Коэффициент изменения индуктивности запишется следующим образом:

$$\gamma = \frac{L_0}{L(t)} = \left(\frac{b_0}{b_0 - V_0 t}\right)^N \qquad (3)$$

Процессы в цепи, содержащей постоянное активное сопротивление и переменную индуктивность, описываются уравнением

$$L(t) \frac{dI(t)}{dt} + I(t)\left(\frac{dL(t)}{dt} + R\right) = 0 \qquad (4)$$

Решение уравнения (4) с учетом (2), (3) и переходом к переменной γ даёт для тока в цепи следующее выражение:

$$I(\gamma) = I_0 \gamma \exp\left[\left(-\frac{\eta}{N-1}\right)\left(\gamma^{\frac{N-1}{N}} - 1\right)\right] \qquad (5)$$

где $$\eta = \frac{R b_0}{V_0 L_0} \qquad (6)$$

Энергия, поглощенная в активной нагрузке, находится по формуле

$$W = \int_0^t I^2(t) R\, dt \qquad (7)$$

Подстановка (5) и (3) в (7) даёт

$$W_N = W_0 \frac{2\eta}{N}\int_1^{\gamma} \gamma^{\frac{N-1}{N}} \exp\left[\left(-\frac{2\eta}{N-1}\right)\left(\gamma^{\frac{N-1}{N}}-1\right)\right]d\gamma$$

После замены переменной $\gamma^{\frac{N-1}{N}} = x$ это выражение перепишется следующим образом:

$$W_N = W_0 \frac{2\eta}{N-1}\exp\left(\frac{2\eta}{N-1}\right)\int_1 x^{\frac{N}{N-1}} \exp\left(-\frac{2\eta}{N-1}x\right)dx$$

В случае, когда $\frac{N}{N-1} = m$ (m -целое >1) (9),

интеграл может быть решен в элементарных функциях. Максимальная величина N из условия (9) равна двум.

Для выяснения влияния показателя N на количество переданной в активную нагрузку энергии удобнее всего воспользоваться возможностью получать решения выражения (8) в аналитическом виде, когда они допускаются условием (9). Это позволит иметь решения не только интересные сами по себе, но и апроксимировать установленную качественную зависимость $W(N)$ на случаи $N>2$. Имея в виду, что решение для $N=1$ дано в /1/, естественно выбрать случай максимального N из условия (9), то-есть $N=2$ и промежуточный между $N=1$ и $N=2$, то-есть $N=1{,}5$. В дальнейшем формулы, соответствующие тому или иному значению N будут сопровождаться цифровыми индексами у основания определяемой величины.

Решая (8) для $N=2$, имеем:

$$W_2 = W_0\left[\left(1+\frac{1}{\eta}+\frac{1}{2\eta^2}\right) - e^{-2\eta(\sqrt{\gamma}-1)}\left(\gamma+\frac{\sqrt{\gamma}}{\eta}+\frac{1}{2\eta^2}\right)\right] \quad (10)$$

для $N=1{,}5$

$$W_{1,5} = \frac{3}{4}W_0\left[\left(\frac{4}{3}+\frac{1}{\eta}+\frac{1}{2\eta^2}+\frac{1}{2\eta^3}\right) - e^{-4\eta(\sqrt[3]{\gamma}-1)}\left(\frac{4}{3}\gamma+\frac{\sqrt[3]{\gamma^2}}{\eta}+\frac{\sqrt[3]{\gamma}}{2\eta^2}+\frac{1}{8\eta^3}\right)\right] \quad (11)$$

Максимумы этих выражений в зависимости от η имеют

место при

$$\eta \approx \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \qquad N=2 \qquad (12)$$

$$\eta \approx \frac{1}{\sqrt[3]{\gamma}} \qquad N=1{,}5 \qquad (13)$$

Физически условия (12) и (13) означают, что для каждого конечного значения γ необходимо с помощью формулы (6) подобрать такие параметры генератора и нагрузки, чтобы вышеназванные соотношения удовлетворялись.

Подставляя (12) и (13) соответственно, в (10) и (11) получаем выражения для энергии, переданной в активную нагрузку, от генератора, работающего в оптимальном режиме

$$W_2 = W_0\left\{\frac{1}{2}\gamma\left[1-5\exp\left(\frac{2}{\sqrt{\gamma}}-2\right)\right]+\sqrt{\gamma}+1\right\} \qquad (14)$$

$$W_{1,5} = \frac{1}{32}W_0\left[\left(32+24\sqrt[3]{\gamma}+12\sqrt[3]{\gamma^2}+3\gamma\right)-71\gamma\exp\left(\frac{4}{\sqrt[3]{\gamma}}-4\right)\right] \qquad (15)$$

В таблице 1 приведены результаты расчета, полученные по формулам (1), (14) и (15) для трех значений γ.

Таблица 1.

γ	Формула (1) $N=1$	Формула (15) $N=1{,}5$	Формула (14) $N=2$
50	3,9	7,4	10,9
100	4,6	11,4	19,7
200	5,3	21,0	37,3

Сравнивая величины, собранные в таблице 1, можно сделать вывод: с увеличением N эффективность передачи энергии значи -

тельно возрастает. С этой точки зрения случаи с $N > 2$ имеют несомненный интерес, но, поскольку решения для них не могут быть получены в аналитическом виде, что значительно усложняет дальнейший анализ, есть смысл ограничиться случаем $N = 2$ и рассмотреть его несколько подробнее.

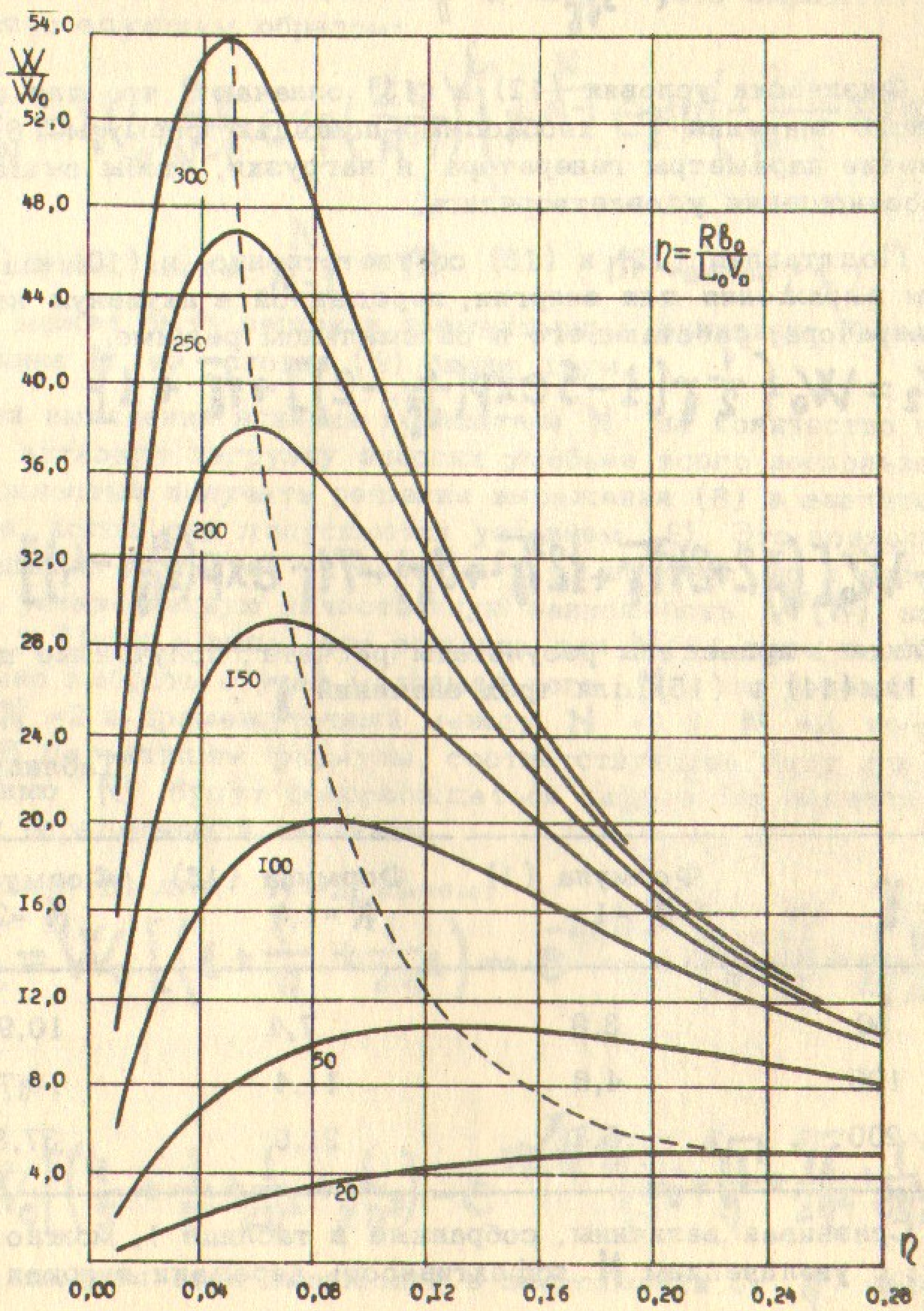

Рис. 2.

На рис. 2 представлены графики $\frac{W}{W_0} = f(\eta)$ при нескольких значениях γ, полученные с помощью формулы (10). Значения γ стоят около соответствующих кривых, штриховая линия проходит через максимумы. С увеличением γ кривые обостряются, что в конечном счете означает возрастание критичности системы к выбору параметра η.

Энергия магнитного поля в генераторе определяется следующим соотношением:

$$W_{2м} = \frac{L(t)I^2(t)}{2} = W_0 \gamma e^{-2\eta(\sqrt{\gamma}-1)} \qquad (17)$$

Максимум полученного выражения в зависимости от γ имеет место при

$$\gamma = \frac{1}{\eta^2}$$

Таким образом, условие максимума передаваемой в нагрузку энергии при $\gamma = const$ и $\eta = var$ совпадает с условием максимума энергии магнитного поля при $\eta = const$ и $\gamma = var$, причём величина последней записывается следующим образом:

$$W_{2м} = W_0 \gamma e^{\left(\frac{2}{\eta} - 2\right)} \qquad (18)$$

Вопрос о способе её утилизации может быть решен в каждой конструкции конкретно. Анализируя общий случай, то-есть выражение:

$$W_{Nм} = W_0 \gamma \exp\left[-\frac{2\eta}{N-1}\left(\gamma^{\frac{N-1}{N}} - 1\right)\right] \qquad (19)$$

нетрудно показать, что и величина энергии магнитного поля в генераторе с увеличением N также увеличивается.

Квадратичный закон $L(t)$ осуществляется в опытах с мегагауссными полями при обжатии полых металлических цилиндров. Такая конструкция в своем первоначальном виде не может быть использована в качестве источника питания активных нагрузок из-за своих очевидных недостатков – малой начальной индуктивности и сложности исполнения вывода к нагрузке. Если сопротивление потребителя имеет величину $\sim 10^{-1} \div 10^{-3}$ ом, от МК-генератора требуется относительно большая начальная индуктивность. Поэтому наиболее рационально использовать многовитковые конструкции в виде однослойных соленоидов. В принципе, для осуществления заданных здесь зависимостей $L(t)$, можно воспользоваться конструктивной схемой генератора, рассмотренной в работе /1/, делая шаг витков переменным. Но в этой конструкции, при желании получить N сколь-нибудь значительно отличающимся от единицы, неизбежно придется столкнуться с трудностями производственного характера. Соображения подобного рода наводят на мысль об объединении в одном генераторе положительных качеств двух упомянутых конструктивных схем. К таковому можно отнести генератор на базе соленоида с треугольным поперечным сечением и числом витков $\omega > 1$. При такой геометрической форме соленоида перемещение любой из образующих его граней меняет индуктивность по квадратичному закону рис. 3(сплошная линия).

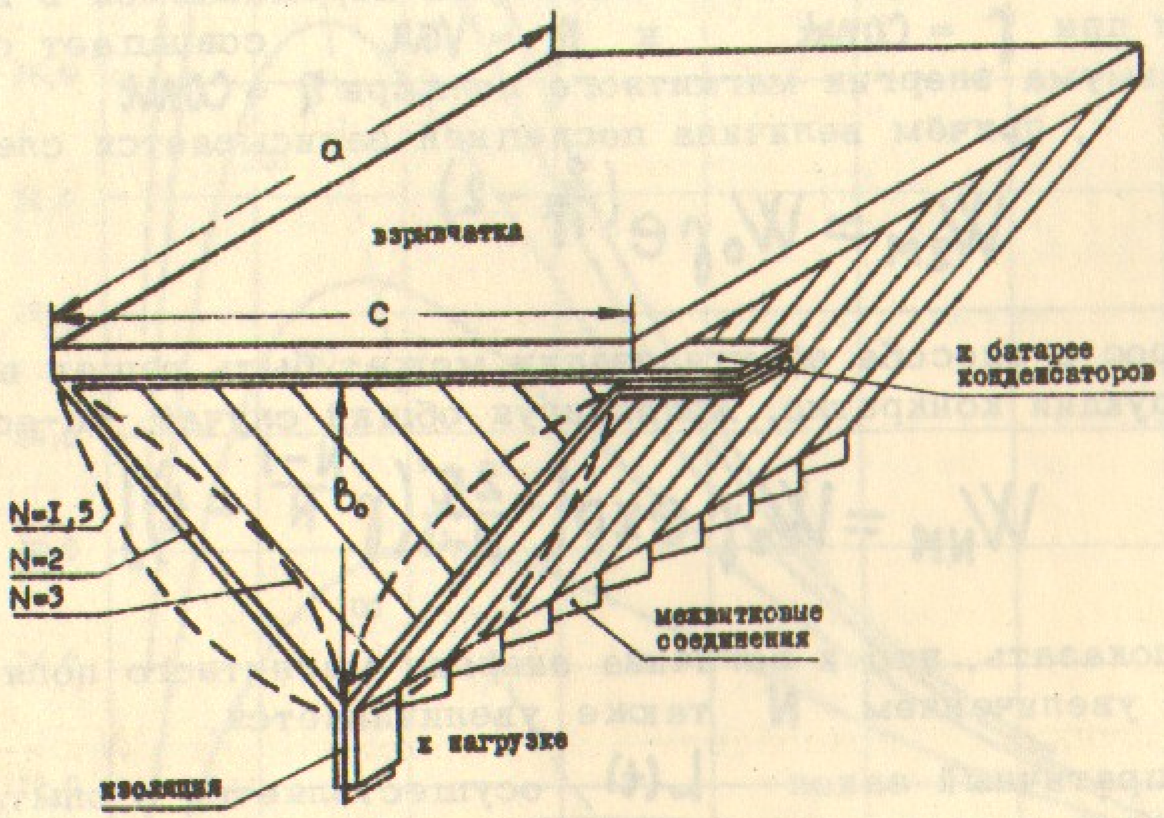

Рис. 3.

Так как для работы МК-генератора, построенного по этой конструктивной схеме, достаточно перемещения лишь одной из граней, образующих соленоид, подсоединение нагрузки осуществляется довольно просто. Взрывчатка должна располагаться вдоль грани, противоположной выводу. Подобная конструкция в одновитковом исполнении удовлетворительно работала в опытах по получению сильных магнитных полей /3/.

Пренебрегая концевыми эффектами, можно считать изменение индуктивности пропорциональным изменению площади поперечного сечения соленоида. Тогда нужный закон $L(t)$ может быть задан соответствующим профилированием сечения. В тех случаях, когда заданный закон $L(t)$ имеет большое N, нужно иметь в виду следующее:

Из сравнения соотношений (12) и (13) можно установить, что с увеличением N при тех же конечных γ, величина η уменьшается. Формула (6) показывает, что при прочих равных условиях, это означает необходимость увеличения L_0. Но, как показано на рис.3, возможность осуществления больших N на базе треугольного соленоида идёт за счет уменьшения отношения площади поперечного сечения соленоида к его периметру. В тех же габаритных размерах соленоида общее уменьшение индуктивности также имеет место. Таким образом, увеличение индуктивности до требуемой соотношением (6) величины может происходить только путём значительного увеличения числа витков и размеров соленоида. Следствием этого является усиление влияния собственных потерь в генераторе на процессы в системе, точный учет которого представляет самостоятельную задачу и выходит за рамки данной статьи.

Выводы:

1. Нелинейный закон $L(t)$ позволяет значительно улучшить соотношение $W_N = f(\gamma)$. Задавая этот закон в виде степенной функции с показателем N, можно при $N = \frac{m}{m-1}$ получать решения $W_N(\gamma, \eta)$ в аналитическом виде.
2. Применение указанных закономерностей сопровождается увеличением энергии магнитного поля в генераторе, которая может быть нужным образом утилизована.
3. Использование соленоида с треугольным поперечным сечением в качестве базы для создания МК-генераторов позволяет относительно просто обеспечивать требуемые величины L_0 и зависимости $L(t)$, не создавая принципиальных трудностей для подсоединения нагрузки.

Автор благодарит кандидатов физ.-мат.наук Долгова-Савельева Г.Г.,Войтенко А.Е. и Олейника А.Г. за полезные обсуждения и интерес к работе.

Литература

1. R.L. Conger, J. Appl. Phis, V.38, N5, 1967, p.2275

2. А.Д.Сахаров, У.Ф.Н., т. 88, № 4, 1966, 725.

3. H. Kolm at all, High Magnetic Fields, 1962, New York.

Ответственный за выпуск Б.А.Яблочников

Подписано к печати 25.02.1969 г.

Усл. 0,6 печ.л., тираж 150 экз. Бесплатно.

Заказ № 281.

Отпечатано на ротапринте в ИЯФ СО АН СССР.