

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



13/x-75

M-345

9 - 9006

И.М.Матора, В.А.Саввин

У007/2-75

ТЕОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСА  
НЕОДНОРОДНОЙ ФОРМИРУЮЩЕЙ ЛИНИЕЙ  
НА ПРОИЗВОЛЬНОЙ НАГРУЗКЕ

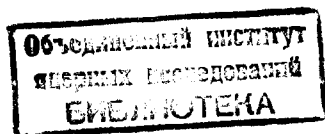
**1975**

9 - 9006

И.М.Матора, В.А.Саввин

ТЕОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСА  
НЕОДНОРОДНОЙ ФОРМИРУЮЩЕЙ ЛИНИЕЙ  
НА ПРОИЗВОЛЬНОЙ НАГРУЗКЕ

Направлено в журнал "Радиотехника  
и электроника"



## *Введение*

В последние годы неоднородные формирующие линии /НФЛ/, составленные из сосредоточенных емкостей и индуктивностей, находят все более широкое применение. Они с успехом используются даже на столь сложных нагрузках, как индукторы линейных индукционных ускорителей и импульсные трансформаторы мощных электронных пушек СВЧ-генераторов и ускорителей, параметры которых существенно изменяются в течение формируемого импульса.

Применение для расчета этих устройств известной теории, развитой для случая постоянных во времени емкости, индуктивности и активного сопротивления элементов нагрузки /1, 2/, дает возможность лишь приближенной оценки некоторых необходимых параметров НФЛ /3, 4/, т.к. при этом требуется делать искажающие суть проблемы предположения. В частности, для некоторых сложных нагрузок не удастся составить адекватную схему замещения. Естественно, эта методика не дает возможности проводить ни количественного анализа системы "НФЛ-нагрузка", ни синтеза оптимальной конструктивной схемы НФЛ, наилучшим образом подходящей для заданной переменной нагрузки.

Ниже приводится теория работы системы "НФЛ-нагрузка", свободная от вышеупомянутых упрощающих предположений, основой которой является реальная схема НФЛ и нагрузки с учетом действительных параметров всех составляющих их элементов.

### Расчетная схема

На рис. 1 изображена схема системы "НФЛ-нагрузка", в которой НФЛ представлена набором конденсаторов и регулировочных индуктивностей. Поскольку каждый конденсатор обладает собственной индуктивностью, в некоторых случаях сравнимой с величиной регулировочных индуктивностей, то для ее учета каждый из конденсаторов представлен в виде последовательного звена  $C_i - S_i$ , где  $C_i$  - емкость, а  $S_i$  - собственная индуктивность  $i$ -го конденсатора НФЛ.

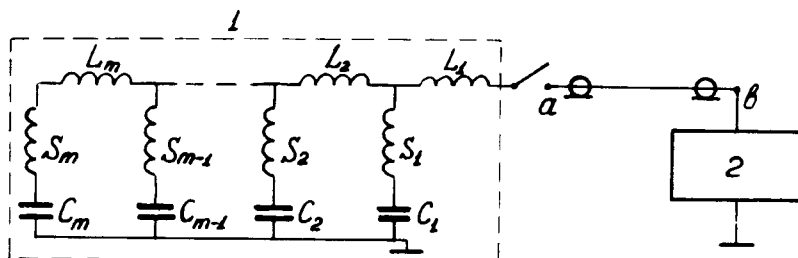


Рис. 1. Схема неоднородной формирующей линии: 1 - НФЛ, 2 - нагрузка.

НФЛ разряжается на нагрузку через ключ и подводящие коммуникации. В качестве ключа в мощной импульсной технике обычно применяют тиратрон, который обладает столь малым внутренним сопротивлением, что им можно пренебречь. Собственная же его индуктивность  $L_{кл}$  часто сравнима с регулировочными индуктивностями  $L_i$  и в описываемой теории может быть учтена. Иногда необходимы подводящие коммуникации в виде кабелей или полосковых линий. В этом случае параметры коммуникаций также могут быть учтены.

Как показано ниже, можно описать реальные нагрузки таким образом, чтобы даже в наиболее общем случае зависимости их параметров от времени получались правильные уравнения между характеризующими систему токами  $J_H$  и напряжениями  $U_H$ .

Мы опишем здесь нагрузки следующих типов:

1. Активное сопротивление  $R = \text{const}$ . Здесь связь между током и напряжением нагрузки максимально проста - это известный закон Ома:

$$U_H = R J_H. \quad /1/$$

2. Индукторная ускоряющая секция линейного индукционного ускорителя /ЛИУ/.

Будем рассматривать индукторы ЛИУ типа ЛИУ-3000<sup>/5/</sup>, инжектора "Астрон"<sup>/6/</sup>, ЛИУ-30/250<sup>/7/</sup> и ЛИУ-5/5000<sup>/4/</sup>, материал которых - пермаллой 50 НП. Индуктор представляет собой тороидальный сердечник, намотанный, для уменьшения вихревых токов, из тонкой пермаллоевой ленты. Быстрое, в течение долей микросекунды, перемагничивание индуктора, при котором направленный азимутально вектор  $\vec{B}$  меняется в пределах от  $-B_r$  до  $+B_r$ , создает направленное вдоль оси вихревое ускоряющее поле ЛИУ<sup>/8/</sup>.

Уравнение связи между током и напряжением этой нагрузки получим из следующих соображений.

Известно, что процесс импульсного перемагничивания ферромагнетика с ППГ описывается уравнением<sup>/9/</sup>

$$\dot{B} = \frac{R(1 - B^2/B_s^2)(H(t) - H_0)}{1 + R(1 - B^2/B_s^2)\frac{\sigma\delta^2}{2B_r}(B + B_r)}. \quad /2/$$

Здесь  $B_r$ ,  $B_s$  - остаточная индукция и индукция насыщения;  $R$  - динамическое сопротивление материала сердечника;  $H_0$  - поле старта;  $\sigma$  - электропроводимость материала;  $\delta$  - полутолщина ленты сердечника;  $H(t)$  - напряженность магнитного поля в рассматриваемой точке сердечника, создаваемая внешними источниками тока, а точка над  $B$  означает дифференцирование по времени.

Наружный и внутренний радиусы ферромагнитных сердечников существенно различаются. Так, в ускорителе ЛИУ-30/250  $r_H / r_{вн} = 2,15$  для индукторов начального участка ускорителя и 2,5 - для основных индукторов. Вследствие этого  $H(t)$  в /2/ существенно различна для радиальных слоев. Для учета этого различия индуктор

необходимо разбить на достаточно тонкие радиальные зоны, в которых  $H(t)$  без большой ошибки можно считать постоянным. Поле в этих слоях примем

$$\bar{H}_\gamma = \frac{J(t) + J_\Pi(t)}{2\pi\bar{r}_\gamma}, \quad (\gamma = 1, 2, \dots, M), \quad /3/$$

$J(t)$  и  $J_\Pi(t)$  - перемagnичивающий ток и размagnичивающий ток ускоряемого пучка, соответственно, а скорость изменения индукции в каждой зоне будет<sup>/9/</sup>

$$\dot{\bar{B}}_\gamma = \frac{R(1 - \bar{B}_\gamma^2/B_S^2)(\bar{H}_\gamma(t) - H_0)}{1 + R(1 - \bar{B}_\gamma^2/B_S^2) \frac{\sigma \delta^2}{2B_r}(\bar{B}_\gamma + B_r)}. \quad /4/$$

В /3/ и /4/  $\bar{r}_\gamma = \frac{r_\gamma + r_{\gamma-1}}{2}$  - средний радиус зоны,

$M$  - число всех зон.

Тогда напряжение, приложенное к индуктору, определяется как

$$U_H = f \sum_{\gamma=1}^M S_\gamma \dot{\bar{B}}_\gamma, \quad /5/$$

где  $f$  - коэффициент заполнения индуктора,  $S_\gamma$  - площадь  $\gamma$ -ой зоны разбиения индуктора.

Таким образом, связь между протекающим через нагрузку током и напряжением в данном случае описывается уравнениями /3/, /4/ и /5/. В случае ферритов в /4/ следует положить  $\sigma = 0$ .

3. Импульсный трансформатор<sup>/10/</sup> на основе ускоряющей секции ЛИУ для электронной пушки с нагружающими электронным током и током смещения.

Его расчетная схема изображена на рис. 2. Здесь катод  $K$  расположен на металлическом стержне, проходящем вдоль оси всех  $N$  штук индукторов трансформатора. Индукторы возбуждаются параллельно импульсом от НФЛ.

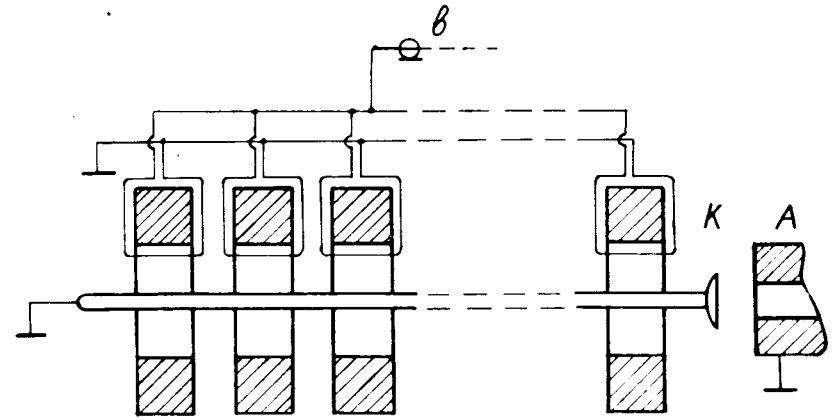


Рис. 2. Схема импульсного трансформатора на основе индукторной ускоряющей секции.  $A$  - анод,  $K$  - катод.

Анод  $A$  заземлен. Ток смещения  $J_c(t)$  с катода на землю выражается через его емкость  $C_{ак}$  так:

$$J_c(t) = -C_{ак} N \dot{U}_H; \quad /6/$$

электронный ток с катода  $J_\Pi(t)$ , нагружающий систему вместе с током смещения  $J_c(t)$ , вычисляется для относительно малых напряжений по формуле

$$J_\Pi(t) = -\alpha (NU_H)^{3/2}, \quad /7/$$

где  $\alpha$  - постоянная, зависящая от плотности эмиссии. Любая другая зависимость  $J_\Pi(NU_H)$ , заданная аналитически или в виде таблицы, полученной экспериментально на этой пушке, также может быть учтена.

Связь между током и напряжением нагрузки в данном случае выражается как

$$\bar{H}_\gamma = \frac{J(t)/N + J_\Pi(t) + J_c(t)}{2\pi\bar{r}_\gamma}, \quad /8/$$

$$\dot{U}_H = \frac{f \sum_{\gamma=1}^M S_{\gamma} \frac{R(1 - \bar{B}_{\gamma}^2/B_s^2) [J(t) / N - \alpha (NU_H)^{3/2} - 2\pi \bar{\Gamma}_{\gamma} H_0]}{[1 + R(1 - \bar{B}_{\gamma}^2/B_s^2) \frac{\sigma \delta^2}{2B_r} (B_r + \bar{B}_{\gamma})] 2\pi \bar{\Gamma}_{\gamma}} - U_H}{NC_{ак} \cdot f \sum_{\gamma=1}^M S_{\gamma} \frac{R(1 - \bar{B}_{\gamma}^2/B_s^2)}{[1 + R(1 - \bar{B}_{\gamma}^2/B_s^2) \frac{\sigma \delta^2}{2B_r} (B_r + \bar{B}_{\gamma})] 2\pi \bar{\Gamma}_{\gamma}}}, \quad /9/$$

/ J(t) - разрядный ток НФЛ/.

Следует отметить, что как в описании нагрузки 2, так и 3 было использовано предположение об идеальности трансформатора, каким в действительности и является каждый пермаллоевый индуктор ЛИУ. В случае же многовитковых трансформаторов с несимметричными обмотками даже на основе таких же индукторных пермаллоевых магнитопроводов следует ожидать, что это предположение не будет вполне соответствовать действительности. Разумеется, это нужно будет учитывать при получении связи между током и напряжением в нагрузке такого типа.

#### Разряд НФЛ на нагрузку

Получим уравнения, описывающие процесс разряда НФЛ, изображенной на рис. 1.

Применяя последовательно законы Кирхгофа к каждой ячейке формирующей линии, получим

$$\begin{aligned} U_a - U_1 &= L_1 \dot{J}_1 \\ U_2 - U_1 &= L_2 \dot{J}_2 \\ \dots & \\ U_m - U_{m-1} &= L_m \dot{J}_m \end{aligned} \quad /10/$$

В системе уравнений /10/  $U_a$  - напряжение в точке "а",  $U_j$  - напряжение на выводах j-го конденсатора, которое равно напряжению на его пластинах за вычетом падения напряжения на собственной индуктивности, т.е.

$$U_j = Q_j/C_j + S_j \dot{Q}_j, \quad /11/$$

где  $Q_j$  - заряд на пластинах j-го конденсатора. Ток, протекающий через регулировочную индуктивность  $L_j$ , складывается из разрядных токов конденсаторов, изображенных левее этой индуктивности на рис. 1, т.е.

$$J_j = - \sum_{\alpha=j}^m \dot{Q}_{\alpha}. \quad /12/$$

Подставив выражения /11/ и /12/ в систему /10/ и произведя несложные преобразования, получим

$$\begin{aligned} U_a - Q_1/C_1 &= (S_1 + L_1) \ddot{Q}_1 + L_1 \sum_{\alpha=2}^m \ddot{Q}_{\alpha} \\ Q_1/C_1 - Q_2/C_2 &= -S_1 \ddot{Q}_1 + (S_2 + L_2) \ddot{Q}_2 + L_2 \sum_{\alpha=3}^m \ddot{Q}_{\alpha} \\ \dots & \\ Q_{m-1}/C_{m-1} - Q_m/C_m &= -S_{m-1} \ddot{Q}_{m-1} + (S_m + L_m) \ddot{Q}_m \end{aligned} \quad /13/$$

или в матричном виде

$$\begin{pmatrix} U_a - Q_1/C_1 \\ Q_1/C_1 - Q_2/C_2 \\ \dots \\ Q_{m-1}/C_{m-1} - Q_m/C_m \end{pmatrix} = (LS) \begin{pmatrix} \ddot{Q}_1 \\ \ddot{Q}_2 \\ \dots \\ \ddot{Q}_m \end{pmatrix}, \quad /14/$$

где матрица (LS) имеет вид

$$\begin{pmatrix} (S_1 + L_1) & L_1 & L_1 & \dots & L_1 \\ -S_1 & (S_2 + L_2) & L_2 & \dots & L_2 \\ 0 & -S_2 & (S_3 + L_3) & \dots & L_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & (S_m + L_m) \end{pmatrix} \quad /15/$$

Следовательно,

$$\begin{pmatrix} \ddot{Q}_1 \\ \ddot{Q}_2 \\ \dots \\ \ddot{Q}_m \end{pmatrix} = (LS)^{-1} \begin{pmatrix} U_a - Q_1/C_1 \\ Q_1/C_1 - Q_2/C_2 \\ \dots \\ Q_{m-1}/C_{m-1} - Q_m/C_m \end{pmatrix} \quad /16/$$

Матричное уравнение /16/ описывает процесс разряда НФЛ.

Как уже говорилось, между точками "а" и "б" в схеме, изображенной на рис. 1, могут быть включены кабели, передающие линии или просто короткие малоиндуктивные отрезки подводющих шин. Учет влияния подводющих коммуникаций проиллюстрируем на примере включенных в параллель между точками "а" и "в"  $n$  кабелей с волновым сопротивлением  $\rho$ .

Разобьем каждый кабель на короткие звенья, индуктивность и емкость которых выражаются через известное волновое сопротивление  $\rho$ , погонную емкость  $C_{\Pi}$  и длину  $d$  кабеля так:

$$C_{ЗВ} = \frac{d \cdot C_{\Pi}}{K}; \quad L_{ЗВ} = \rho^2 C_{ЗВ}$$

Число звеньев  $K$  определяется необходимой точностью расчета.

Таким образом, учет кабелей сводится к включению между точками "а" и "в" схемы, изображенной на рис. 3.

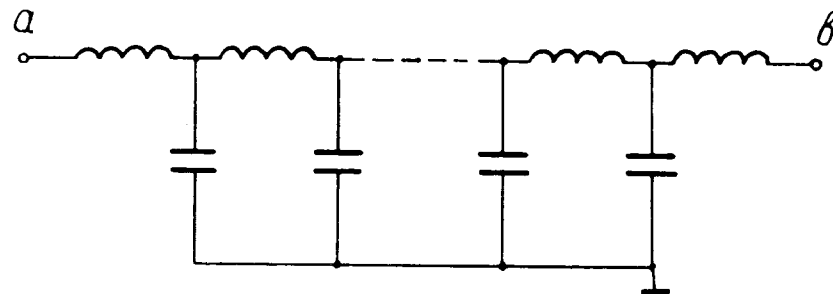


Рис. 3. Расчетная схема учета кабелей, включенных между НФЛ и нагрузкой.

Система уравнений, описывающая процесс передачи импульса от НФЛ к нагрузке, получается аналогично /13/

$$\begin{aligned} \ddot{q}_1 &= \dot{J}_1/n - \omega^2 (q_1 - q_2) \\ \ddot{q}_2 &= \omega^2 (q_1 - 2q_2 + q_3) \\ &\dots \\ \ddot{q}_k &= \omega^2 (q_{k-1} - 2q_k + C_{ЗВ} \cdot U_H), \end{aligned} \quad /17/$$

где  $q_j$  - заряд на  $j$ -ом элементе длины кабеля,  $J_1(t)$  - ток через индуктивность  $L_1$ .

В точке "в" /рис. 1/ сходятся токи, протекающие по кабелям, и суммарный ток равен

$$J_H = J_1 - n \sum_{\beta=1}^K \dot{q}_{\beta} \quad /18/$$

Таким образом,  $U_a$  в уравнении /16/ есть  $q_1/C_{ЗВ}$  в случае, когда между точками "а" и "в" включены кабели,

и  $U_H$  - когда нагрузка присоединяется с помощью малоиндуктивных подводящих шин.

К уравнениям /16/, /17/ и /18/ остается добавить уравнение, связывающее ток и напряжение в нагрузке. В общем виде его можно записать:

$$F(U_H, \dot{U}_H, J_H, \dot{J}_H, P_V) = 0, \quad /19/$$

где функция  $F$  зависит как от переменных во времени величин  $U_H$ ,  $\dot{U}_H$ ,  $J_H$ ,  $\dot{J}_H$ , так и от всех постоянных параметров нагрузки  $P_V$ . В некоторых конкретных случаях /19/ записывается в виде системы линейных или нелинейных дифференциальных уравнений.

Итак, полная система уравнений, описывающая процесс разряда НФЛ на нагрузку, состоит из групп уравнений, описывающих разряд НФЛ /16/, передачу импульса по кабелям /17/ и уравнения связи тока и напряжения в нагрузке /19/.

Подчеркнем, что все эти группы уравнений являются взаимосвязанными, поскольку в каждой из них есть уравнения связи с другими группами.

Начальные данные для переменных выбираются из следующих соображений.

К моменту коммутации все конденсаторы НФЛ заряжены до напряжения  $U_{зар}$ , токи в схеме отсутствуют и напряжение на кабеле равно нулю. Следовательно,

$$\begin{aligned} Q_j &= C_j U_{зар} \\ \dot{Q}_j &= 0 \quad (j = 1, 2, \dots, m) \\ q_\beta &= 0 \\ \dot{q}_\beta &= 0 \quad (\beta = 1, 2, \dots, K). \end{aligned} \quad /20/$$

В случае нагрузок 2,3 необходимо учитывать процесс перемагничивания индукторов по зонам, причем скорость изменения индукции в каждой зоне описывается уравнением /2/. Это уравнение наиболее точно описывает процесс перемагничивания ферромагнетика с ППГ из начального состояния  $B_0 = -B_r$ . В реальных ЛИУ и трансфор-

маторах начальная индукция будет различна для разных слоев индуктора, так как она определяется не только величиной тока размагничивания в момент коммутации и статической петлей гистерезиса материала, из которого изготовлен индуктор, но и величиной  $\bar{g}_y$ . Ясно также, что нестабильность величины тока размагничивания в момент срабатывания приводит к нестабильности формы импульса напряжения /тока/ нагрузки.

Этих недостатков можно избежать, если специальным образом сфазировать переменный или импульсный ток размагничивания с моментом коммутации. При этом следует, очевидно, добиться такой синхронизации, чтобы импульс перемагничивания от НФЛ начинался в момент равенства нулю размагничивающего тока, который перед началом импульса имел бы необходимое для размагничивания отрицательное значение. Разумеется, амплитуда его должна быть достаточной для перевода в состояние насыщения всех слоев индуктора, которые автоматически окажутся намагниченными до  $-B_r$  при снижении абсолютной величины тока размагничивания до нуля.

Соблюдение всех этих условий приведет не только к тому, что перемагничивание всех слоев сердечника будет начинаться с одного и того же начального значения индукции  $-B_r$ , но также и к повышению КПД системы, т.к. ток размагничивания в момент импульса отсутствует и не нагружает ее, и кроме того, к улучшению стабильности.

Следует отметить некоторый недостаток описания нагрузок типа 2 и 3, состоящий в том, что из формулы /2/, при отсутствии перемагничивающего тока следует, что вихревое напряжение на нагрузке отлично от нуля за счет поля старта  $H_0 \neq 0$ .

Однако непосредственные расчеты показывают, что связанная с этим ошибка в расчете импульса имеет заметную величину лишь на незначительной начальной части импульса. Так, при импульсе длительностью 1 мкс, интервал времени, на котором ошибка заметна, составляет не более 0,1 мкс.



В заключение приносим искреннюю благодарность И.М.Франку за ряд ценных замечаний и П.С.Анцупову и Р.В.Харьюзову за многочисленные полезные дискуссии.

### Литература

1. О.Н.Литвиненко, В.И.Сошников. Теория неоднородных линий и их применение в радиотехнике. М., Сов. радио, 1964.
2. С.И.Евтянов, Г.Е.Редькин. Импульсные модуляторы с искусственной линией, М., Сов. радио, 1973.
3. П.В.Букаев, В.П.Саранцев. ОИЯИ, Р9-5129, Дубна, 1970.
4. Ю.П.Вахрушин. ОИЯИ, 9-8117, Дубна, 1974.
5. А.И.Анацкий и др. АЭ, 21, 439 /1966/.
6. N.C.Christofilos et al. Rev.Sci.Instr., 35, /см. перевод. Приб. научн. иссл., 35, /7/, 150 /1964//.
7. Ю.П.Вахрушин, И.М.Матора. УФН, 110, в.1, 117, 1973.
8. И.М.Матора. ЖТФ, XXIX, 190, 1969.
9. А.И.Пирогов, Ю.М.Шамаев. Магнитные сердечники в автоматике и вычислительной технике. М., Энергия, 1967.
10. П.С.Анцупов, О.С.Богданов и др. НИИЭФА, А-0213, Ленинград, 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел  
10 июля 1975 года.