

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



С 3456  
X-236

2885/2-78

9 - 11395

Р.В.Харьюзов, В.А.Швец

ЭЛЕКТРОННАЯ НАГРУЗКА  
В ЛИНЕЙНОМ ИНДУКЦИОННОМ УСКОРИТЕЛЕ

**1978**

9 - 11395

Р.В.Харьюзов, В.А.Швец

ЭЛЕКТРОННАЯ НАГРУЗКА  
В ЛИНЕЙНОМ ИНДУКЦИОННОМ УСКОРИТЕЛЕ

Отечественный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Харьюзов Р.В., Швец В.А.

9 - 11395

Электронная нагрузка в линейном индукционном ускорителе

Анализируются причины, не позволяющие увеличить в существующих линейных индукционных ускорителях (ЛИУ) ускоряемый импульсный ток до нескольких килоампер. Рассматривается эквивалентная схема генератора (импульсная система ЛИУ) с электронной нагрузкой (пучком) методом теории цепей, и показано, что с применением в индукционной системе ЛИУ ускоряющих элементов (индукторов) с числом витков  $n \geq 2$  есть возможность повысить величину ускоряемого тока до 10-20 кА, что существенно отличает ЛИУ от конкурирующих ускорителей прямого действия более высокой надежностью в работе, длительностью импульса и частотой следования посылок.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Kharyusov R.V., Shvets V.A.

9 - 11395

Electron Loading in a Linear Induction Accelerator

The reasons for which the pulse current accelerated could not be increased up to a few kiloamperes in existing linear induction accelerators (LIA) are discussed. The equivalent circuit of generator (LIA pulse system) with electron loading (beam) by the chain theory method is considered. It is shown that there is a possibility to increase accelerated current value up to 10-20 kA by using in LIA induction system of accelerating elements (inductors) with a coil number more than 2. The LIA is more reliable in operation, has better pulse duration and cycle frequency as compared to the existing direct action accelerators.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubno 1978

Процесс импульсного перемангничивания ферромагнитных сердечников индукторов ЛИУ, в результате которого на оси ускорителя возникает вихревое электрическое ускоряющее поле, протекает в течение интервала времени порядка  $10^{-6} \div 10^{-8}$  с. Несмотря на то, что импеданс индуктора за этот период изменяется в несколько раз<sup>1/</sup>, мощные импульсные генераторы с формирующей линией и тиратроном позволяют формировать импульсы ускоряющего поля, более или менее близкие по форме к прямоугольным, причем постоянство ускоряющего поля в течение импульса достигается в результате коррекции его формы путем введения в схему генератора корректирующих реактивностей /при условии, что нагрузка током либо постоянна, либо вообще незначительна/ или использования неоднородных формирующих линий, импеданс которых изменяется за время импульса по закону, близкому к закону изменения импеданса нагрузки.

Нагрузка генератора содержит две компоненты и может быть представлена в виде параллельно включенных сопротивлений, одно из которых связано с потерями при перемангничивании индуктора, а другое - с затратами энергии на ускорение пучка. Ток пучка, как правило, неизменен в течение импульса и обладает чисто активным сопротивлением, трансформируемым в первичную обмотку индуктора с коэффициентом трансформации, равным единице. Это объясняется тем, что в существующих линейных индукционных ускорителях при ускорении импульсных токов средней интенсивности /100-200А/<sup>1,2/</sup> индуктор с одновитковой обмоткой наиболее целесообразен, т.к. обеспечивает максимальный прирост энергии на

один ускоряющий элемент. Такое традиционное исполнение служит непреодолимым препятствием /о котором будет сказано ниже/ при повышении интенсивностей токов до килоампера.

Вне зависимости от свойств нагрузки и от механизма коррекции, оптимальный к.п.д. импульсного генератора в ЛИУ имеет место при равенстве внутренних сопротивлений генератора и нагрузки в каждый заданный момент времени в течение импульса /режим максимальной передачи мощности от генератора к нагрузке/, а к.п.д. всей импульсной системы в целом определяется соотношением величин сопротивлений, составляющих нагрузку.

Индуктор является составной частью ускоряющей системы, которая, как известно <sup>/2/</sup>, состоит из импульсной и индукционной систем. Работа этих систем настолько взаимосвязана, что тиратронный генератор с искусственной формирующей линией /импульсная система/ разрабатывается конкретно для каждого ЛИУ <sup>/2,3/</sup>, так как все составные части обеих систем являются элементами единого сильноточного контура, которые влияют на форму и величину ускоряющего импульса и ускоряемого в ЛИУ тока. Индукционная система, хотя и напоминает импульсный трансформатор, коренным образом отличается от него, так как вторичная обмотка /электронный пучок/ по отношению к импульсной системе - активный элемент. Этот электронный пучок настолько шунтирует импульсную систему при увеличении его до нескольких килоампер, что в существующих типах ускорительных систем при традиционном одновитковом исполнении индукторов для согласования импеданса электронного тока с импедансом импульсной системы необходим питающий генератор ее с волновым сопротивлением доли ома. Изготовление таких генераторов, как известно, сопряжено с техническими трудностями, и при увеличении ускоряемого в ЛИУ тока всегда приходится идти по пути сокращения числа индукторов, питаемых от одного генератора <sup>/3,4/</sup>, т.е. к удорожанию стоимости ускорителя, так как, помимо пермаллового железа, основную стоимость ЛИУ составляют тиратроны и конденсаторы. Так, например, в ЛИУ-30/250 <sup>/1/</sup> ускоряемый ток электронов составляет 250 А и для питания двух секций из 12÷14

индукторов используется один импульсный генератор с тиратроном ТГИ1-2500/50, а в ЛИУ-5/5000 <sup>/3/</sup> тот же тиратрон используется для питания только трех /в первых двух инжекторных секциях - двух/ индукторов при ускоряемом токе 5 кА, т.е. эффект шунтирования налицо. Анализ же параметров импульсных конденсаторов и тиратронов показывает, что при максимальных рабочих напряжениях 50 кВ и применении двойной формирующей линии /ДФЛ/ собственные индуктивности элементов импульсной и индукционной систем ограничивают верхний предел ускоряемого тока значением единиц килоампер. Применение же в качестве формирующих элементов линий с распределенными параметрами ограничено длительностями формируемых ими импульсов /несколько десятков секунд/.

Один из возможных путей увеличения ускоряемого в ЛИУ тока и одновременно уменьшение его шунтирующего действия на импульсную систему предполагает применение в индукционной системе ускоряющих элементов /индукторов/ с обмоткой, содержащей, в отличие от традиционного исполнения, несколько витков.

Рассмотрим эквивалентную схему генератора /рис.1/ с волновым сопротивлением формирующей линии  $R_{\text{л}}$ .

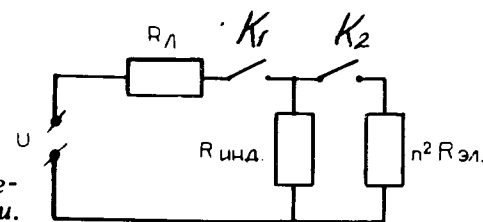


Рис. 1. Эквивалентная схема генератора и нагрузки.

Нагрузку генератора представим в виде параллельно включенных сопротивлений  $R_{\text{инд}}$  и  $n^2R_{\text{эл}}$ , где число витков обмотки индуктора в общем случае обозначено через "n",  $R_{\text{эл}}$  - импеданс электронного тока,  $K_1$  - тиратрон.

В режиме холостого хода /отсутствует электронный ток, ключ  $K_2$  разомкнут/ напряжение на нагрузке

$$U_{x.x.} = \frac{U}{\left(\frac{R_{л.}}{R_{инд.}} + 1\right)} \quad /1/$$

В нагруженном состоянии /ключ  $K_2$  замкнут/

$$U_{нагр.} = \frac{U}{\frac{R_{л.}}{n^2 R_{эл.}} + \frac{R_{л.}}{R_{инд.}} + 1} \quad /2/$$

Отношение  $U_{нагр.} / U_{x.x.} \equiv K$ , характеризующее передачу напряжения в нагрузку, назовем коэффициентом передачи:

$$K = \frac{1 + \beta}{\frac{\alpha}{n^2} + 1 + \beta},$$

где  $\alpha \equiv \frac{R_{инд.}}{R_{л.}}$ ,  $\beta \equiv \frac{R_{инд.}}{R_{л.}}$  /3/

Условие согласования при равенстве  $R_{л.}$  и  $R_{инд.}$  ( $R_{инд.} || n^2 R_{эл.}$ ) записывается в виде:

$$n^2(\beta - 1) = \alpha, \quad /4/$$

и тогда согласованный коэффициент передачи

$$K_{согл.} = \frac{2n^2 + \alpha}{2n^2 + 2\alpha} \quad /5/$$

Графики зависимости  $K_{согл.}(\alpha)$  при различных  $\beta$  представлены на рис. 2.

Анализ этих зависимостей показывает, что уже при числе витков обмотки  $n=2$  ускоряемый в ЛИУ десятикратный ток ( $\alpha=10$ ) уменьшает свое шунтирующее действие в три раза, а при больших  $\beta$  это действие уменьшается до 10.

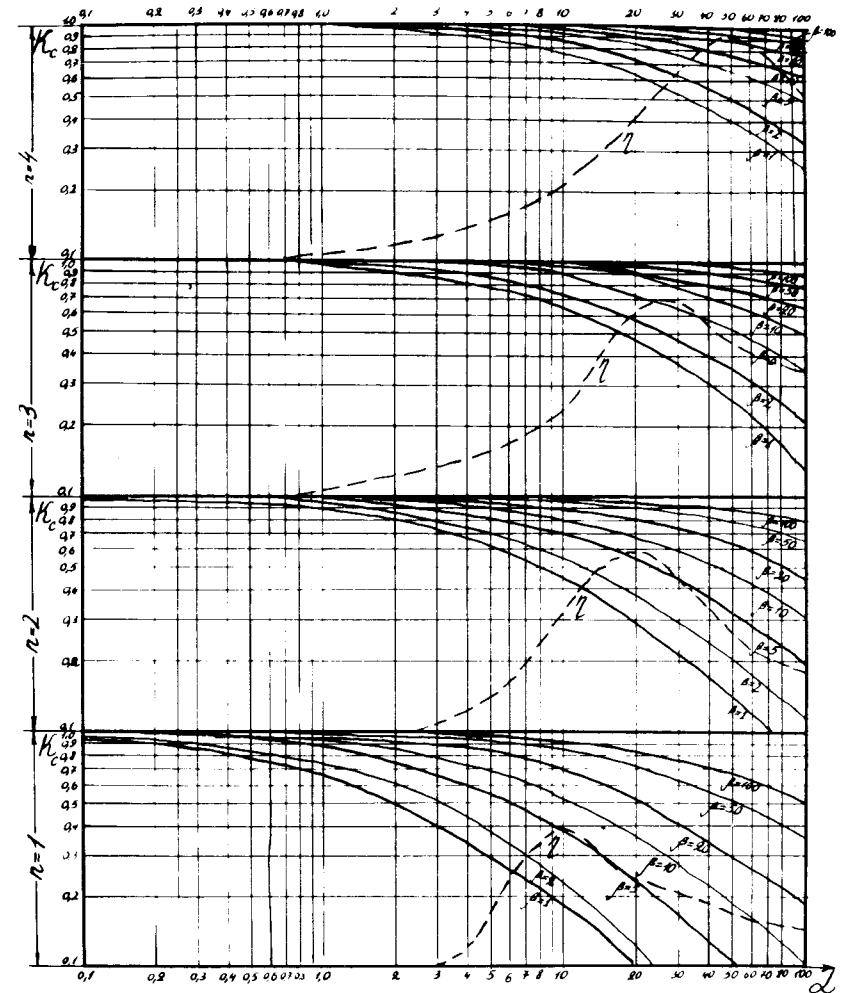


Рис. 2. Зависимости согласованного коэффициента передачи  $K_{согл.}$  и коэффициента полезного действия от соотношения величин, составляющих нагрузку генератора при различных значениях числа витков обмотки "n" индуктора.

Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{(1+\beta^2)\alpha}{(\alpha+\beta+1)^2} = \frac{(1+\beta^2)n^2(\beta-1)}{[n^2(\beta-1) + \beta + 1]^2} \quad /6/$$

как показывает расчет, увеличивается с ростом  $\alpha$  и достигает больших значений при  $n > 1$  /пунктирные линии на рис. 2/.

Кроме того, из известного соотношения для перепада магнитной индукции  $\Delta B$  в индукторе

$$\Delta B = \frac{U\tau}{nS} \quad /7/$$

где  $U$  - амплитуда напряжения импульса,  $S$  - сечение индуктора,  $\tau$  - время, соответствующее росту индукции в сердечнике и равное  $\approx 1/2\tau_{\text{фр}} + \tau_{\text{верш}}$ , следует, что при том же значении  $\Delta B$  в индукторе с увеличенным значением числа витков обмотки в " $n$ " раз есть возможность уменьшить поперечное сечение индуктора в " $n$ " раз. Уменьшение можно произвести в осевом направлении сердечника /рис. 3/ и, таким образом, составленные в секцию "тонкие" индукторы с большим числом витков обмотки практически не изменят общей длины ЛИУ. Это - правомочное решение, так как с увеличением количества витков в " $n$ " раз индуктивность намагничивания увеличивается в " $n^2$ " раз, и поэтому уменьшение сечения индукторов в " $n$ " раз не приведет к увеличению тока намагничивания. Выполнение же в ускоряющем элементе, например, двухвитковой обмотки, конструктивно несложно. В то же время появляется возможность ускорить значительно большие токи без изменения конструкции питающих генераторов.

Так как произведение  $U\tau$  в /7/ задается конструкцией импульсного генератора, питающего индуктор, а энергия, передаваемая ускоряемому электронному пучку  $I_{\text{эл}}$ , определяется соотношением /2/:

$$W_{\text{эл}} = \frac{I_{\text{эл}} \Delta B S}{n^2} \quad ,$$

то число витков обмотки индуктора выбирается из условия, что  $W_{\text{эл}}$  должно быть постоянным, и " $n$ " необходимо увеличивать при увеличении  $I_{\text{эл}}$  по формуле:

$$n = \sqrt{\frac{I_{\text{эл}} U\tau}{W_{\text{эл}}}} \quad .$$

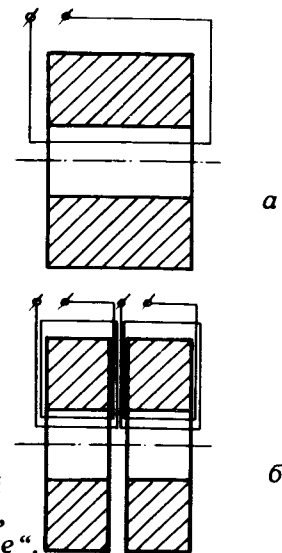


Рис. 3. Индукторы ускорительной секции. а - одновитковый, б - двухвитковые, "тонкие".

При создании мощных импульсных трансформаторов на напряжение в несколько сотен кВ и ток в несколько кА, возникает аналогичная проблема шунтирования нагрузкой импульсного генератора. Такой трансформатор может быть изготовлен так же, как и ускорительная секция, состоящая из многovitковых индукторов. При этом каждая первичная обмотка запитывается от индивидуального импульсного генератора, вторичная одновитковая обмотка по аналогии с электронным пучком является общей для всех индукторов.

Применение индукторов с обмоткой из нескольких витков позволит создать линейные индукционные ускорители на токи 10-20 кА, выгодно отличающиеся от

конкурирующих ускорителей прямого действия более высокой надежностью в работе, длительностью импульса и частотой следования посылок.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Анцупов П.С. и др. Препринт НИИЭФА, А-0213, Ленинград, 1974.
2. Вахрушин Ю.П., Матора И.М. УФН, 1973, т.110, вып.1, с.117.
3. Анацкий А.И. и др. Ускоряющая система линейного индукционного ускорителя ЛИУ-5/5000. В сб.: "Разработка и практическое применение электронных ускорителей" /Материалы IX Всесоюзной конференции по ускорителям, Томск, 3-5 сентября 1975 г./, изд-во ТГУ, Томск, 1975.
4. Beal J.W. et al. IEEE Trans. Nucl.Sci. NS-16, 294, 1969.

Рукопись поступила в издательский отдел  
17 марта 1978 года.