

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



9121

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА

P9 - 9121

И.М.Матора, В.А.Саввин

РАСЧЕТ ИМПУЛЬСОВ,
СФОРМИРОВАННЫХ НЕОДНОРОДНОЙ ЛИНИЕЙ
НА ПРОИЗВОЛЬНОЙ НАГРУЗКЕ

1975

Р9 - 9121

И.М.Матора, В.А.Саввин

РАСЧЕТ ИМПУЛЬСОВ,
СФОРМИРОВАННЫХ НЕОДНОРОДНОЙ ЛИНИЕЙ
НА ПРОИЗВОЛЬНОЙ НАГРУЗКЕ

Направлено в журнал "Радиотехника
и Электроника"



S u m m a r y

The results are given of the computations on voltage and current pulses formed using non-uniform pulse former on the resist load, in the inductor section of linear induction accelerator loaded by accelerated electron current and on the electron gun pulse transformer loaded by beam current and displacement current.

The computations were carried out in conformity with the theory given in /1/.

The results satisfactorily agree with experiment both in the resist load case and for two last loads in which the parameters vary considerably during the pulse.

The comparison of the computation results with experiment shows that the problem of calculation of high accelerated current load effect on accelerate system of linear induction accelerator has been solved.

ВВЕДЕНИЕ

В работе /1/ была описана теория формирования импульса неоднородной формирующей линией /НФЛ/ на нагрузке произвольного типа, в которой параметры могут быть как постоянными, так и существенно переменными в течение импульса.

Теория основывается на системе дифференциальных уравнений, связывающих токи и напряжения и действительные параметры всех реальных элементов НФЛ и нагрузок, которая составлена с помощью законов Кирхгофа и математической формулировки известных физических свойств элементов нагрузок.

Расчет формы импульса напряжения и тока на омической нагрузке, индукторной секции линейного индукционного ускорителя /ЛИУ/, нагруженной током ускоренных электронов, так же, как и расчет импульсного трансформатора электронной пушки, нагруженного током пучка и током смещения, был выполнен по программам решения систем уравнений, данных в /1/. В зависимости от сложности нагрузок время счета на ЭВМ типа БЭСМ-6 составляло от одной до нескольких минут. Расчет по этим программам дает зависимость напряжения /тока/ от времени на любом необходимом его интервале и одновременно все другие желаемые данные о работе системы "НФЛ - нагрузка", такие, как КПД системы, поведение намагниченности слоев ферромагнетика нагрузки и любые другие величины.

Подчеркнем, что в рамках расчета элементарным является получение т.н. функций влияния изменений желаемого параметра как любого элемента НФЛ, так и любого параметра произвольно выбранного элемента всей системы. Эти функции влияния существенно облегчают технику расчета настройки НФЛ с целью получения желаемого импульса на заданной нагрузке.

Расчет с учетом омических потерь в системе в рамках теории также возможен.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 изображены рассчитанный нами и экспериментально полученный в [2] импульс от НФЛ, состоящий из 10 одинаковых звеньев с параметрами $L_1 = 15 \text{ мкГн}$, $L_i = 30 \text{ мкГн} / i = 2, \dots, 10$; $C_i = 3000 \text{ пФ} / i = 1, \dots, 10$ на нагрузке $R = 100 \text{ Ом}$; зарядное напряжение - 500 В.

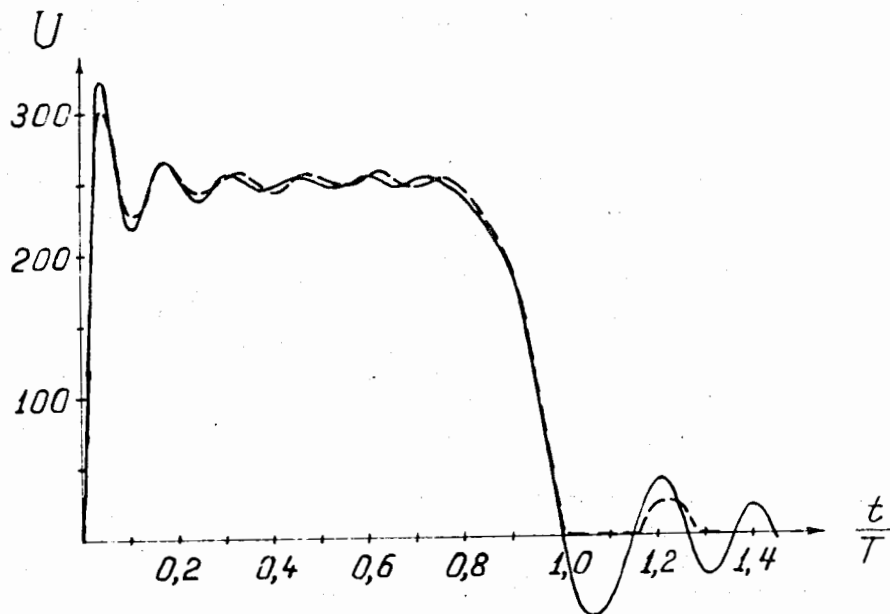


Рис. 1. Импульс напряжения в вольтах на активной нагрузке $R = 100 \text{ Ом}$, - - - эксперимент [2], — Расчет. $T = 6,55 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ /по основанию/.

В [2] масштаб времени отсутствует, однако совпадение амплитуды, формы и длительности импульса при выбранном на рис. 1 масштабе времени для экспериментального импульса не оставляет места для сомнений по пово-

ду качества описания процессов в системе "НФЛ - омическая нагрузка" с помощью описанной в [1] теории. Расчеты работы НФЛ с неодинаковыми звеньями на омическую нагрузку не представляют дополнительных трудностей. На рис. 2 дан пример такого расчета. На этом же рисунке показаны так называемые расчетные функции влияния изменения индуктивности /кривая 2/ и емкости конденсатора /кривая 3/ одного из звеньев /5-го звена/ в приведенном случае на +20% на форму импульса, которые представляют собой разность между возмущенным и исходным импульсами.

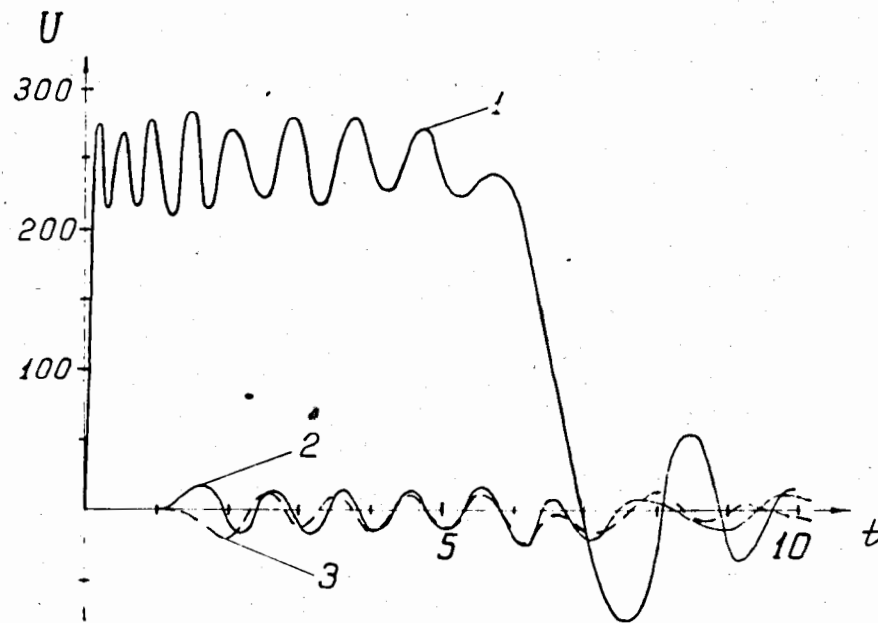


Рис. 2. 1 - импульс напряжения в вольтах на активной нагрузке $R = 100 \text{ Ом}$, формируемый НФЛ с 10 звеньями. $C_i = [1 + 0,44(i-1)] \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$; $L_i = [1 + 0,44(i-1)] \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$. 2,3 - функции влияния изменения L_5 и C_5 на +20%.

Расчетов для нагрузок с зависящими от времени параметрами типа ускоряющих индукторных секций ЛИУ, в которых предсказывается форма всего импульса, не существует. Однако имеется достаточный набор экспериментальных данных, полученных на начальной части

создаваемого ускорителя ЛИУ-30/250^{3/}, получившей название ЛИУ-0,75/250^{4/}.

Сердечники индукторов этого ускорителя, намотанные из пермаллоевой ленты толщиной 10 мкм, имеют следующие размеры по ферромагнетике: $r_{вн} = 10$ см, $r_n = 21,5$ см; площадь поперечного сечения $S = 115$ см² и коэффициент заполнения $f = 0,63$.

НФЛ состоит из двух параллельных линий по 6 конденсаторов в каждой, емкости которых, начиная от нагрузки, есть /в тыс. пФ/: 10, 10, 10, 24, 24, 24 - для 1-й линии и 24, 10, 10, 24, 24, 24 - для 2-ой. Собственная индуктивность /вводов/ каждого конденсатора 0,17 мкГн, а индуктивности звеньев НФЛ, соответственно, были /в мкГн/: 0,85; 0,37; 0,1; 0,33; 0,25; 0,1; 0,33 - для каждой линии. Линии разряжаются через один тиратрон на обе ускоряющие секции ЛИУ-0,75/250 с общим числом индукторов 24 через кабельную коммуникацию из 36 параллельных кабелей. Длина каждого кабеля - 8 м, погонная емкость 100 пФ/м и волновое сопротивление $\rho = 50$ Ом. Зарядное напряжение НФЛ = 50 кВ. На рис. 3 изображен рассчитанный для этих параметров НФЛ импульс /кривая 1/ ускоряющего напряжения U_n , создаваемого каждым индуктором при нагрузке током ускоряемых электронов, имеющим амплитуду 250 А в форму импульса, данную на рис. 4. Импульс /кривая 1/ соответствует изображенной на рис. 4 токовой нагрузке. Кривая 2 соответствует аварийному случаю исчезновения тока ускоряемых электронов, например, из-за выхода из строя электронной пушки ЛИУ. Бросается в глаза перенапряжение, возникающее при этом - амплитуда импульса здесь увеличивается в 1,6 раза по отношению к номинальному режиму.

На рис. 3 приведены также рассчитанные формы импульса для тех же параметров НФЛ при амплитудах токовой нагрузки пучком 100 А /кривая 3/ и 500 А /кривая 4/, из которых видно влияние уровня нагрузки пучком на форму импульса при заданных параметрах НФЛ.

Сравнение этих и других полученных результатов расчета с экспериментом^{4/} показывает, что форма и длительность импульса, а также его амплитуда находятся в удовлетворительном согласии с экспериментом.

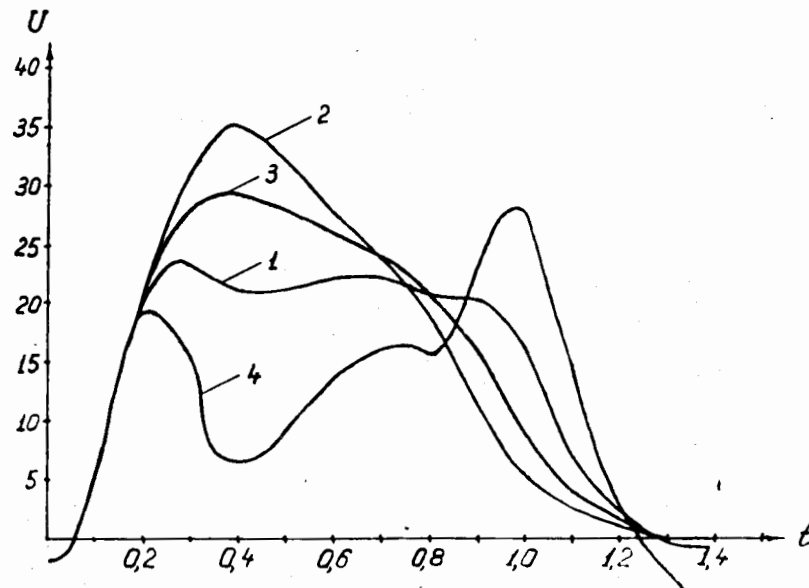


Рис. 3. Импульсы напряжения в киловольтах на индукторах ускоряющих секций ЛИУ-30/250. Расчет. Время в микросекундах.

Рассчитанный коэффициент полезного действия секций /отношение переданной пучку энергии к энергии, запасенной в НФЛ перед импульсом/ составил 29%, что удовлетворительно подтверждается экспериментом^{4/}: измеренное значение КПД было на несколько процентов выше, но и нагружающий токовый импульс в эксперименте был шире, чем на рис. 4.

Экспериментальные данные по перенапряжениям, возникающим в индукторах, при аварийном исчезновении пучка ускоряемых электронов, также хорошо согласуются с предсказаниями теории.

Результаты расчетов работы электронной пушки ЛИУ-0,75/250^{4/}, импульсный трансформатор которой был схематически представлен в работе 1 /рис. 2/, в сравнении с экспериментом приведены на рис. 5, 6. Сердечники магнитопровода импульсного трансформатора пушки здесь те же, что и сердечники вышеупомянутых индук-

торных секций ЛИУ. НФЛ была описана в^{4/}. Расчет был проведен для числа индукторов $N=11$, использовавшихся в эксперименте. Импульс от НФЛ передавался на индукторы трансформатора 24 параллельными кабелями /параметры см. выше/.

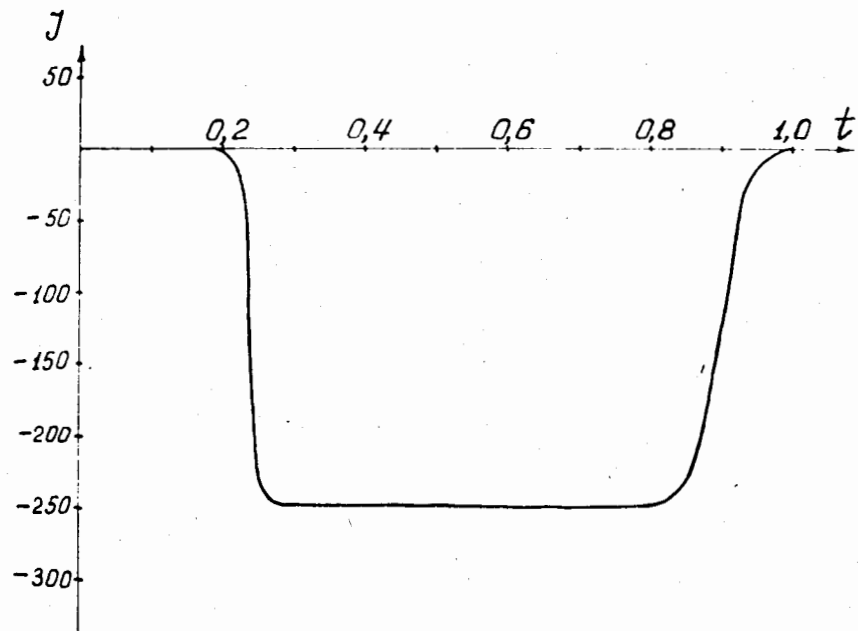


Рис. 4. Импульс токовой нагрузки для рис. 3.

Набор емкостей НФЛ, использованных в эксперименте и расчете, был следующим: /в тыс. пФ/
 10, 5, 10, 10, 10 - для 1-й линии и
 10, 5, 5, 5, 10, 10, 10 - для 2-ой линии.

$C_{ак} = 94$ пФ. Индуктивности в эксперименте измерены не были, а расчетные индуктивности были /в мкГн/:

0,85; 0,68; 0,45; 0,33; 0,75 - для 1-й линии и
 0,85; 0,68; 0,45; 0,33; 0,50; 0,4 - для 2-ой линии.

Ввиду того, что в эксперименте /кривая 1, рис. 5/ имеет место случай не вполне сформированного импульса напряжения /на его вершине неоднородность напряжения

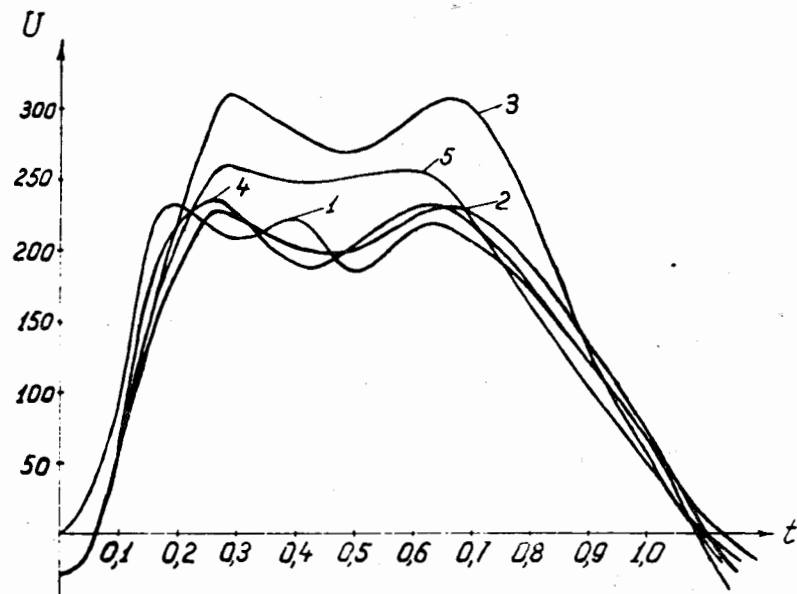


Рис. 5. Экспериментальный /1/ и расчетный /2/ импульсы напряжения в киловольтах на импульсном трансформаторе электронной пушки ЛИУ-30/250 с учетом нагрузки пучком. 3 - импульс напряжения для тех же условий, но при отсутствии тока эмиссии с катода; 4 - импульс напряжения при игнорировании тока смещения; 5 - сформированный расчетный импульс с удовлетворительной однородностью напряжения на "столе".

достигает $\pm 10\%$, в расчете /кривая 2/ мы подобрали такие индуктивности НФЛ, которые создают примерно такую же, как в эксперименте, форму импульса, а не стремились к идеальной настройке НФЛ. Однако и на этом наборе можно понять все особенности работы системы "НФЛ - электронная пушка". Тем не менее, чтобы показать принципиальную возможность получения импульса с хорошей однородностью напряжения на "столе", дается расчетная кривая 5, полученная с другими L_i .

Как и следовало ожидать, существование нагрузки током смещения наряду с нагрузкой током пучка демпфирует перепад напряжений на рабочей части импульса, что видно из сравнения кривых 2 и 4 на рис. 5.

Что касается коэффициента полезного действия пушки, то для рассмотренных параметров от тока смещения он практически не зависит и составляет $\approx 36\%$ как при учете J_c , так и при игнорировании последнего. Величина КПД в данном случае существенно превосходит его величину, полученную для ускорительных секций по той причине, что там импульс нагружающего пучка был взят короче импульса напряжения на секциях. Независимость КПД от J_c является, очевидно, следствием знакопеременности последнего /см. кривую 4 на рис. 6/ при одновременной одинаковости знака напряжения.

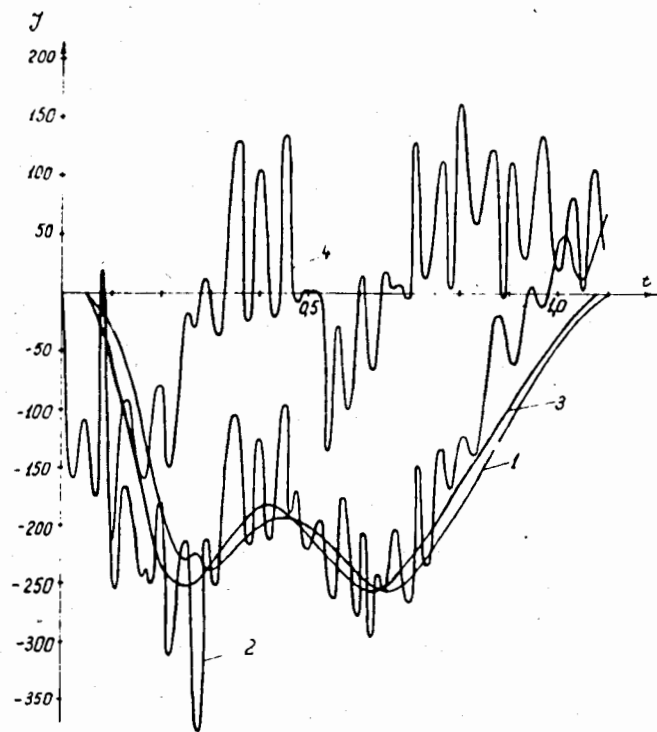


Рис. 6. Импульсы тока в амперах для условий, соответствующих рис. 5. 1 - электронный ток на выходе из пушки $/a = 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ A/V}^{3/2}$, 2 - полный ток, 3 - электронный ток при игнорировании тока смещения, $/a = 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ A/V}^{3/2}$, 4 - ток смещения при отсутствии электронного тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты, полученные при решении на ЭВМ систем уравнений, составленных с помощью развитой в [1] теории, удовлетворительно согласуются с экспериментом во всех приведенных /в том числе и наиболее сложных/ случаях зависящих от времени нагрузок. При этом в результате решения получается существенно более точная, многообразная и полная информация, чем это могут обеспечить традиционные приближенные аналитические методы.

Представляется обоснованной уверенность в том, что эта теория позволит решать основные задачи анализа работы системы "НФЛ - нагрузка" и синтеза ее оптимальных схем в каждом конкретном случае.

В заключение считаем приятным долгом поблагодарить П.С.Анцупова и Р.В.Харьюзова за многочисленные полезные дискуссии, И.И.Шелонцева - за помощь в отработке программы, а также сотрудников НИИЭФА В.Г.Житенева и А.И.Орлова - за выполненные измерения.

Литература

1. И.М.Мажора, В.А.Саввин. ОИЯИ, 9-9006, Дубна, 1975.
2. С.И.Евлянов, Г.Е.Редькин. Импульсные модуляторы с искусственной линией. М., Сов. радио., 1973.
3. Ю.П.Вахрушин, И.М.Мажора. УФН, 110, в. 1, 117, 1973.
4. П.С.Анцупов, О.С.Богданов и др. НИИЭФА, А-0213, Ленинград, 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 августа 1975 года.