

МНОГОИМПУЛЬСНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ МАГНИТОКУМУЛЯТИВНОГО ГЕНЕРАТОРА

© 2012 г. К. В. Горбачёв, Е. В. Нестеров, В. А. Строганов, Е. В. Черных

Объединенный институт высоких температур РАН
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2

Поступила в редакцию 26.09.2011 г.

Описаны результаты экспериментов по генерации пачки наносекундных сильноточных импульсов с помощью многообмоточного динамического трансформатора, в основе которого лежат принцип рекуперации энергии, запасенной в единой первичной обмотке, и метод последовательного перехвата магнитного потока несколькими вторичными обмотками. Для обострения импульсов тока генератора применен индуктивный накопитель энергии с прерывателем тока. Последовательно с интервалом примерно 10 мкс за время порядка 100 нс заряжены до напряжения около 300 кВ шесть небольших электрических емкостей.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Современный этап развития физических исследований в области термоядерного синтеза, физики твердого тела, генерации сильных магнитных полей, физики высоких плотностей энергии, а также работы по ряду новых технологических процессов характеризуются качественным изменением требований к системам электропитания. Сейчас ставится задача перевода этих систем в частотный или частотно-пачечный режим работы при сохранении высоких требований к их удельной энергоемкости и мощности.

Взрывные магнитокумулятивные генераторы (м.к.г.) обладают наивысшими из современных источников энергии удельными характеристиками. Используя уже разработанные методы, можно провести компрессию импульса тока м.к.г. Наиболее адекватным м.к.г. методом обострения импульса тока является метод индуктивного накопителя энергии.

Этот метод включает в себя две стадии: стадию накопления энергии и стадию вывода энергии в нагрузку. На стадии вывода энергии ток индуктивного накопителя энергии посредством промежуточного резистивного импеданса (прерывателя тока) и коммутатора переключается в нагрузку.

Наиболее мощным из известных является электровзрывной прерыватель тока. Его использование сопряжено с решением самосогласованной задачи генерации высоковольтного импульса, когда возникает взаимосвязь характеристик импульса зарядки индуктивного накопителя энергии, главной из которых является эффективная длительность импульса, и параметров электровзрывного прерывателя тока (скорости роста сопротивления и электрической прочности продуктов электрического взрыва). Применение многокаскадных м.к.г. с

магнитной связью каскадов посредством перехвата магнитного потока [1] обеспечивает наиболее полное согласование характеристик м.к.г. и электровзрывного прерывателя тока.

В составе автономных устройств обычно используются двухкаскадные м.к.г., состоящие из предусилительного каскада и динамического трансформатора. Индуктивность спирали предусилителя заряжается током разряда небольшого емкостного накопителя. В предусилителе происходит усиление энергии, запасаемой в первичной обмотке динамического трансформатора. В этом процессе динамический трансформатор изолирует нагрузку. Образование контура вторичной обмотки динамического трансформатора происходит за счет разрушения электрической изоляции провода первого витка спирали его вторичной обмотки стенкой лайнера, расширяющегося под действием продуктов детонации взрывчатого вещества.

ГЕНЕРАЦИЯ ПАЧКИ ИМПУЛЬСОВ ТОКА

Одним из способов генерации пачки импульсов может являться использование отдельных м.к.г., тем или иным способом рассредоточенных в представляемом объеме. В данной работе с целью сокращения занимаемого объема предлагается использовать многообмоточный динамический трансформатор. Принцип действия предлагаемого генератора понятен из приведенной на рис. 1 принципиальной схемы. Многообмоточный динамический трансформатор имеет единую первичную обмотку и несколько намотанных последовательно одна за другой вторичных обмоток. Радиус намотки одинаков для всех вторичных обмоток. Платой за малые габариты и технологичность устройства является довольно узкий

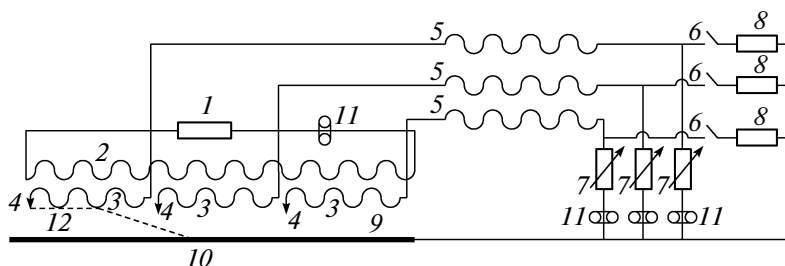


Рис. 1. Принципиальная схема многообмоточного динамического трансформатора. 1 – магнитокумулятивный преусилитель; 2 – первичная обмотка с индуктивностью L_1 ; 3 – вторичные обмотки с индуктивностью L_{2j} (j – порядковый номер обмотки); 4 – взрывной замыкатель тока; 5 – индуктивный накопитель энергии с индуктивностью $L_{ИНЭ}$; 6 – разрядник; 7 – электровзрывной прерыватель тока; 8 – нагрузка; 9 – лайнер; 10 – заряд конденсированного взрывчатого вещества; 11 – пояс Роговского; 12 – продукты детонации.

диапазон интервалов следования импульсов в пределах 5–15 мкс и ограниченное число импульсов в пачке.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ МНОГООБМОТОЧНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Расчеты схемы на рис. 1 проводились с использованием компьютерной программы, состоящей из двух подпрограмм. Первая из них [2] применялась для расчета индуктивностей, взаимоиндуктивностей и их производных спиралей многообмоточного динамического трансформатора, а вторая [3], в которую экспортировались данные из первой подпрограммы, – для расчета электрических характеристик генератора.

Были проведены расчеты двух вариантов многообмоточного динамического трансформатора: 1) с отсечками (в результате электрического пробоя или преднамеренными) части внешней обмотки, лежащей до плоскости стыка внутренней обмотки, по которой скользит точка контакта “спираль – лайнер”, и следующей за ней обмотки; 2) с сохранением электрической прочности межобмоточного зазора. В первом случае отмечается быстрый рост тока в первичной обмотке при коэффициенте усиления тока около 4, во втором – ток увеличился в этой обмотке в 2.5 раза.

Однако поскольку для первого случая в момент перехвата магнитного потока индуктивность внешней обмотки ниже, а коэффициент связи обмоток увеличился незначительно по сравнению со вторым случаем, перехватываемые величины магнитных потоков не сильно отличаются в том и другом случае. Как следствие, при равных начальных токах в первичных обмотках (в момент перехвата магнитного потока первой внутренней обмоткой) токи в цепях внутренних обмоток отличаются не более чем на 10%.

Для выравнивания по амплитуде импульсов тока в каждой из вторичных обмоток и принимая во внимание тот факт, что лимит по шагу намотки

исчерпывается наименьшим (по электрической прочности изоляции) диаметром используемого провода, мы применили вариацию длины вторичных обмоток. Ниже приведены значения длин внутренних обмоток спроектированного многообмоточного динамического трансформатора:

№ внутренней обмотки	1	2	3	4	5	6
Ее длина, мм	70	70	65	65	60	55

Внешний вид трансформатора показан на рис. 2.

Каждая внутренняя обмотка состояла из двух секций: первой длиной 15 мм с одним витком и секции с шагом намотки 2.07 мм. Диаметр намотки внутренних обмоток составил 80 мм, а их общая длина – 385 мм. Внутренние обмотки были нагружены чисто индуктивной нагрузкой около 18 мкГн.

Измерение тока проводилось с помощью магнитных зондов, вмонтированных в каркасы соленоидов нагрузки. В экспериментах преусилитель имитировался соответствующей по емкости конденсаторной батареей. К моменту перехвата магнитного потока первой внутренней обмоткой в первичной обмотке многообмоточного динамического трансформатора запасалась энергия 3.6 кДж.

На рис. 3 приведены временные зависимости тока в первичной обмотке многообмоточного динамического трансформатора и его производной. Ток в этой обмотке после перехвата магнитного потока увеличился к моменту полного вывода ее индуктивности в 2 раза, т.е. можно предположить, что электропрочность изоляции первичной обмотки сохраняется, по крайней мере, до завершения работы последней вторичной обмотки многообмоточного динамического трансформатора.

На рис. 4 представлены расчетные и экспериментальные временные зависимости токов в каждой из внутренних обмоток. Получено достаточно высокое для м.к.г. совпадение этих данных.

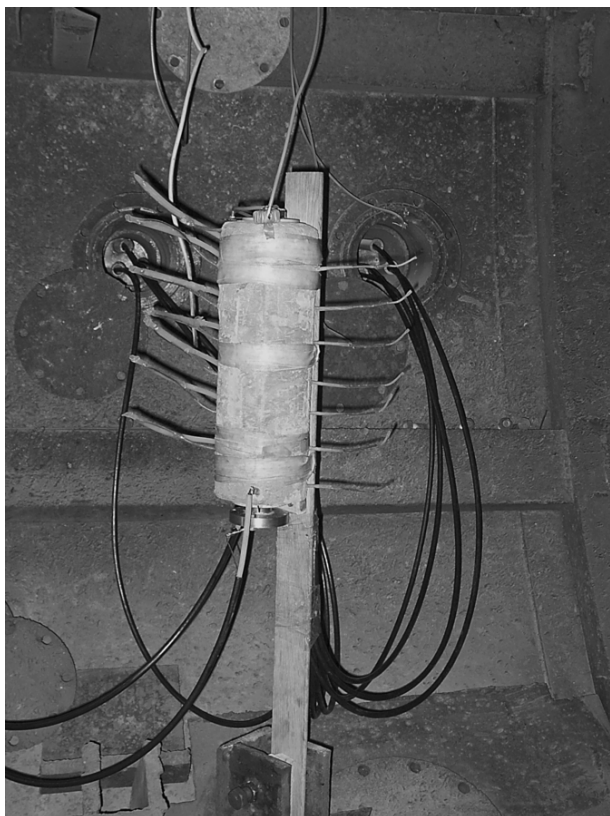


Рис. 2. Внешний вид многообмоточного динамического трансформатора.

В среднем каждая вторичная обмотка обеспечила генерацию в индуктивном накопителе энергии около 1 кДж, суммарно 5.84 кДж, т.е. коэффициент усиления по энергии составил 1.62, а общий коэффициент усиления магнитного потока 4.3.

ГЕНЕРАЦИЯ ПАЧКИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ

В качестве одного из применений многообмоточного динамического трансформатора рассмотрим последовательную быструю зарядку нескольких емкостных нагрузок. Обеспечение работоспособности многообмоточного динамического трансформатора при использовании метода индуктивного накопителя накладывает на характеристики основных элементов определенные ограничения. Дело в том, что в многообмоточном динамическом трансформаторе все его обмотки магнитосвязаны и следует таким образом выбирать параметры элементов схемы преобразования, чтобы напряжение на обмотках не превышало электропрочность изоляции проводов обмоток.

В первом приближении можно пренебречь значением напряжения на j -ой разомкнутой вторичной обмотке с индуктивностью L_{2j} , связанного с компрессией движущимся лайнером магнит-

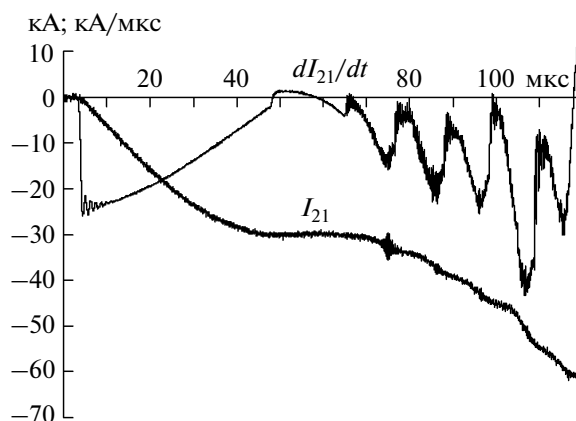


Рис. 3. Временные зависимости тока в первичной обмотке многообмоточного динамического трансформатора и его производной.

ного потока, сцепленного с вторичной обмоткой L_{2i} , по которой скользит точка касания лайнер-спираль. Тогда выражение для напряжения холостого хода на j -ой разомкнутой вторичной обмотке записывается в следующем виде:

$$U_{xxj} = [k_{1,2j}k_{1,2i} + k_{2i,2j}] \sqrt{L_{2j}L_{2i}} \frac{U_{\text{ПТ}}}{(L_{2i} + L_{\text{ИНЭ}})},$$

где $j > i$; $k_{1,2j}$ – коэффициент связи первичной обмотки и j -ой обмотки с индуктивностью L_{2j} ; $k_{2,2i}$ – коэффициент связи первичной обмотки и i -обмотки с индуктивностью L_{2i} ; $k_{2i,2j}$ – коэффициент связи i -обмотки и j -ой обмотки; $U_{\text{ПТ}}$ – напряжение на прерывателе тока. Коэффициент магнитной связи обмоток равняется отношению взаимной индуктивности обмоток к среднегеометрическому значению их индуктивностей.

Если в процесс роста напряжения на прерывателе тока изоляция проводов внутренней обмотки сохраняет свою электрическую прочность, напряжение $U_{\text{ПТ}}$ достигнет его пикового значения. В противном случае это напряжение равно $U_{\text{ПТ}}(t_e)$, где t_e – момент пробоя изоляции проводов внутренней обмотки. Анализ приведенного выражения показывает, что для уменьшения U_{xx} следует за счет, например, уменьшения числа проволочек электровзрывного прерывателя тока уменьшить $U_{\text{ПТ}}(t_e)$ и работать с высокоимпедансным индуктивным накопителем.

Эксперименты по генерации пачки наносекундных импульсов высокого напряжения проводились в соответствии с принципиальной схемой на рис. 1. В качестве нагрузок использовались шесть одинаковых конструктивных конденсаторов небольшой электрической емкости (около 220 пФ). Учитывая весьма высокий импеданс такой нагрузки, при котором в процессе накопления энергии отбор тока в нагрузку минимален, для упрощения

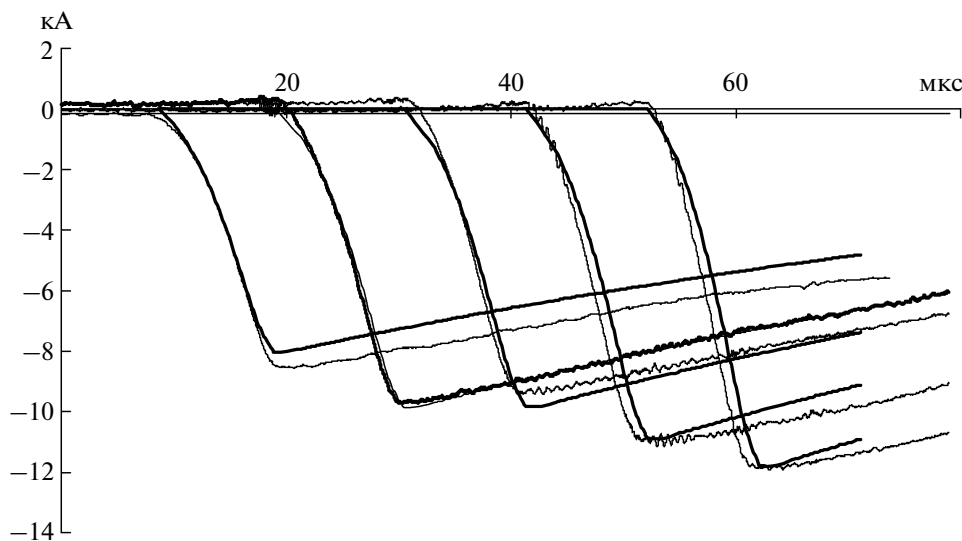


Рис. 4. Расчетные (полужирные линии) и экспериментальные (тонкие линии) временные зависимости токов в каждой из внутренних обмоток многообмоточного динамического трансформатора.

схемы из нее были исключены отделяющие нагрузку разрядники.

Каждый конденсатор был сопряжен в едином блоке с электровзрывным прерывателем тока и индуктивным накопителем энергии. Индуктивность каждого накопителя вместе с передающей линией составляла примерно 21 мкГн. Многообмоточный динамический трансформатор имел характеристики, приведенные выше. Число медных проволочек в каждом из прерывателей тока выбиралось таким образом, чтобы, с одной стороны, обеспечить генерацию высокого напряжения, а с другой, сохранить электрическую прочность изоляции проводов остальных внутренних обмоток.

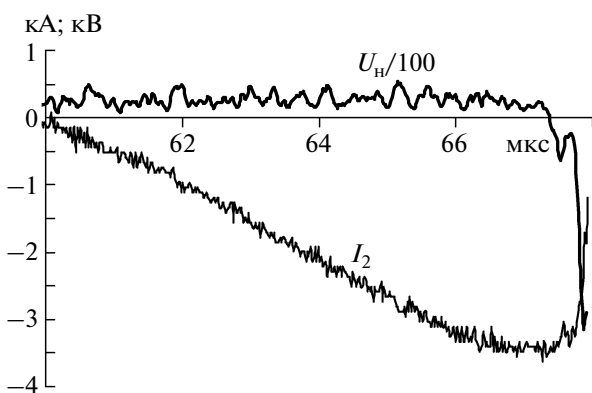


Рис. 5. Временные зависимости тока в индуктивном накопителе и напряжения зарядки нагрузочного конденсатора.

В общем виде напряжение холостого хода на пассивных внутренних обмотках записывается в следующем развернутом виде:

$$U_{xxj} = M_{2i,2j} \frac{dI_{2i}}{dt} - M_{1,2i} \frac{dI_1}{dt} + I_{2i,2j} \frac{dM_{2i,2j}}{dt} + I_{2i} \frac{dM_{1,2i}}{dt}.$$

Ниже представлены некоторые результаты расчетов с использованием ранее указанных компьютерных программ для первых двух внутренних обмоток:

<i>n</i>	2	3	4	5
U_{xx2} , кВ	35.6	41.2	45.7	59.8
U_n , кВ	308	367	363	357

Из представленных данных можно видеть, что при уменьшении числа проволочек от 5 до 3 напряжение зарядки конденсатора нагрузки U_n практически неизменно. При $n = 2$ отбор тока в нагрузку оказывается соизмеримым с током индуктивного накопителя, и напряжение зарядки резко снижается.

Примененное в опыте распределение числа проволочек длиной 350 мм по всем шести электровзрывным прерывателям тока следующее:

№ внутренней обмотки	1	2	3	4	5	6
Число проволочек	4	5	4	5	4	4

На рис. 5 показаны временные зависимости тока в индуктивном накопителе и напряжения зарядки нагрузочного конденсатора. Аналогичные зависимости получены и для других пяти внут-

ренных обмоток многообмоточного динамического трансформатора.

Таким образом, в эксперименте все шесть электрических емкостей нагрузок многообмоточного динамического трансформатора были примерно за 100 нс заряжены до напряжения 300 ± 30 кВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных экспериментов показали, что м.к.г. предложенного типа – многообмоточный динамический трансформатор – может успешно использоваться для генерации пачки из 5–10 быстронарастающих импульсов тока в высокоимпедансных нагрузках с интервалом между импульсами 5–10 мкс. Применение многообмоточного динамического трансформатора в схеме обострения тока с индуктивным накопителем энергии позволило обеспечить в экспериментах последовательную зарядку до примерно 300 кВ шести небольших конденсаторов за время порядка 100 нс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Давыдов В.А., Чернышев В.К.* // Прикл. механика и техн. физика. 1981. № 6. С. 112.
2. *Chernykh Ye.V., Gorbachev K.V., Lisichkin A.L., Nesterov E.V.* // Proceedings of the 11 International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. London, 10–14 September 2006. London: Loughborough University, 2007. P. 391.
3. *Кочкин Ю.М., Нестеров Е.В., Фортков В.Е., Черных Е.В.* Препринт ИВТАН № 6-371. М., 1993.