



Галанин М.П., Крылов М.К.,
Лотоцкий А.П., Родин А.С.

Моделирование динамики
лайнера в магнитном
компрессоре установки МОЛ
при питании ускорителя от
индуктивного накопителя
энергии

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Моделирование динамики лайнера в магнитном компрессоре установки МОЛ при питании ускорителя от индуктивного накопителя энергии / М.П.Галанин [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2013. № 77. 18 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-77>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук**

**М.П.Галанин, М.К.Крылов,
А.П.Лотоцкий, А.С.Родин**

**Моделирование динамики лайнера
в магнитном компрессоре установки МОЛ
при питании ускорителя
от индуктивного накопителя энергии**

Москва — 2013

Галанин М.П., Крылов М.К., Лотоцкий А.П., Родин А.С.

Моделирование динамики лайнера в магнитном компрессоре установки МОЛ при питании ускорителя от индуктивного накопителя энергии

Выполнены расчеты электрофизических характеристик компрессора магнитного потока для установки МОЛ при питании его ускорительной системы от индуктивного накопителя энергии. Рассчитана форма пластин плоского лайнера в процессе ускорения, которая оказалась сходной с ранее полученными расчетными и экспериментальными результатами для макета магнитного компрессора (МК) «ПУМА», работающего от емкостного источника тока. Получены данные для выбора оптимальной точки «захвата» сжимаемого магнитного потока, обеспечивающей короткий (менее 10 мкс) фронт тока в нагрузке без резкого снижения его амплитуды. Результаты работы использованы при проектировании МК «МОЛ» с энергией на входе 5 МДж.

Ключевые слова: магнитный компрессор, лайнер, индуктивный накопитель, импульс тока во внешней цепи

Mikhail Pavlovich Galanin, Mikhail Konstantinovich Krylov, Alexey Pavlovich Lotockii, Aleksandr Sergeevich Rodin

Modeling of liner dynamics in the magnetic compressor of the MOL unit in the case of the accelerator being powered from the inductive energy storage

The magnetic compressor is considered. The compressor is a part of the unit MOL which is powered from the inductive energy storage. The calculations of the compressor electro physical parameters are carried out. The deformations of liner plane plates were computed. The liner forms in these calculations are similar with the liner forms in previous calculations and in experiment results for the compressor prototype “PUMA” which is powered from the capacity energy storage. The data for the choice of optimal time moment of magnetic field capture were received. These data make it possible to form the output pulse with the short front (less than 10 microsecond) without sharp decrease of peak current. The obtained results are used for the design of MOL magnetic compressor with the input energy more than 5 MJ.

Key words: magnetic compressor, liner, current pulse in output circuit, inductive energy storage

Работа выполнена при поддержке корпорации «Росатом» (контракт № Н.4х.44.90.13.1108) и частично Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 12-01-00109, № 12-01-31193).

Введение. Общее предназначение и принцип работы МК

Ранее описанные эксперименты [1] с магнитным компрессором выполнены с использованием емкостного источника питания. Их основная цель заключалась в отработке конструктивных элементов ускорителя лайнера, демонстрации работоспособности системы накачки магнитного потока и его сжатия при выводе энергии. Параллельно с выполнением физических экспериментов на МК создан комплекс моделей и вычислительных программ, позволяющих проводить расчетные эксперименты. Установленное соответствие вычислительных и экспериментальных результатов позволяет прогнозировать результаты работы с МК на следующем этапе – использование МК с ранее запланированным индуктивным накопителем (ИН) [2, 3]. На этом этапе МК должен обеспечивать получение коротких (менее 10 мкс) фронтов тока при большой выходной мощности. Цель работы – получить необходимые расчетные данные для проектирования и изготовления МК для установки МОЛ на энергию 5 МДж.

1. Сравнительные характеристики устройств МК, питаемых от емкостного или индуктивного накопителей

1.1. Частотные характеристики, связанные с полупериодом емкостного тока

В использованной ранее [1, 2] расчетной электрической схеме МК полагалось, что цепь лайнера, подключаемая к нагрузке, остается соединенной последовательно с ускорительным контуром при сжатии магнитного потока до окончания всего процесса разгона лайнера и генерации импульса нагрузочного тока. В то же время эксперименты показали, что в конце синусоидальной полуволны ускорительного тока лента лайнера на диэлектрической подложке обрывается. Из-за исчезновения магнитного поля, прижимающего лайнер к поверхности, падает сила трения, и относительное удлинение свободного участка пластины превышает максимально допустимую величину $\Delta l/l=1,35$. Эта максимальная величина ранее была определена экспериментальным путем для образцов из используемого материала лайнера (алюминий АД-0, А5М). При обрыве пластины цепь лайнера электрически отсоединяется от ускорительного витка, что не учитывалось в расчетах.

Поскольку фаза сжатия магнитного потока совпадает по времени со вторым полупериодом тока ускорительного контура, то расчетная кривая тока нагрузки имела составляющую тока конденсаторной батареи, отсутствующую в экспериментальных данных. Получение адекватной расчетной картины процессов актуально для следующего этапа расчетных работ, связанных с питанием МК установки МОЛ от ИН. В цепях с изменяющейся индуктивностью разряд ИН имеет апериодическую форму тока. Поэтому разделить фазу ускорения лайнера и фазу сжатия магнитного потока, как это произошло со специально выбранным емкостным накопителем энергии МК «ПУМА», не

представляется возможным. В ускорительном контуре, имеющем максимум индуктивности в промежуточной точке X_{Lm} ($X_o < X_{Lm} < X_{max}$) перемещения лайнера [4], его движение от позиции X_{Lm} к X_{max} при сжатии магнитного потока будет сопровождаться возвратом части тока в ускорительный виток и обмотку ИН, шунтирующих контур сжатия. От возврата тока и, соответственно, магнитной энергии желательно избавиться, так как к системе предъявлены высокие требования по КПД устройства. Таким образом, экспериментально наблюдаемое автоматическое отключение цепи лайнера после его ускорения является положительным фактором, который должен быть отражен в расчетах.

Отключение лайнера от ускорительной цепи в данной работе смоделировано в расчетах введением в схему специального выключателя, условно имевшего два устойчивых состояния и срабатывающего в момент включения нагрузки. Результаты двух сравнительных численных экспериментов по ускорению лайнера и генерации тока в нагрузке показаны ниже при одинаковых исходных начальных условиях зарядки емкостного источника тока МК «ПУМА» и геометрии.

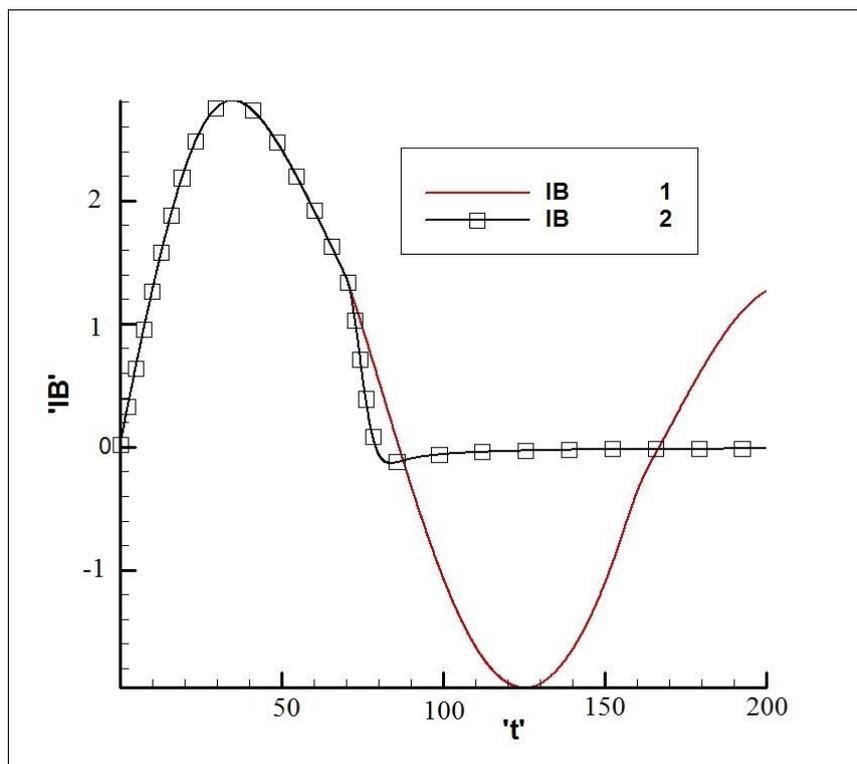


Рис. 1.1. Ток в цепи индуктора (I_B)

На рис. 1.1 приведены графики тока в ускорительном витке (время - в микросекундах, ток – в мегаамперах). График 1 соответствует расчету, в котором цепь лайнера остается последовательно соединенной с ускорительным контуром при сжатии магнитного поля, а график 2 – расчету, в котором моделируется отключение лайнера от ускорительной цепи на этапе сжатия магнитного поля.

Момент времени $t = 70$ мкс соответствует одновременному подключению нагрузки к цепи сжимающегося лайнера и отключению этой цепи от ускорительного витка и источника тока на графике 2.

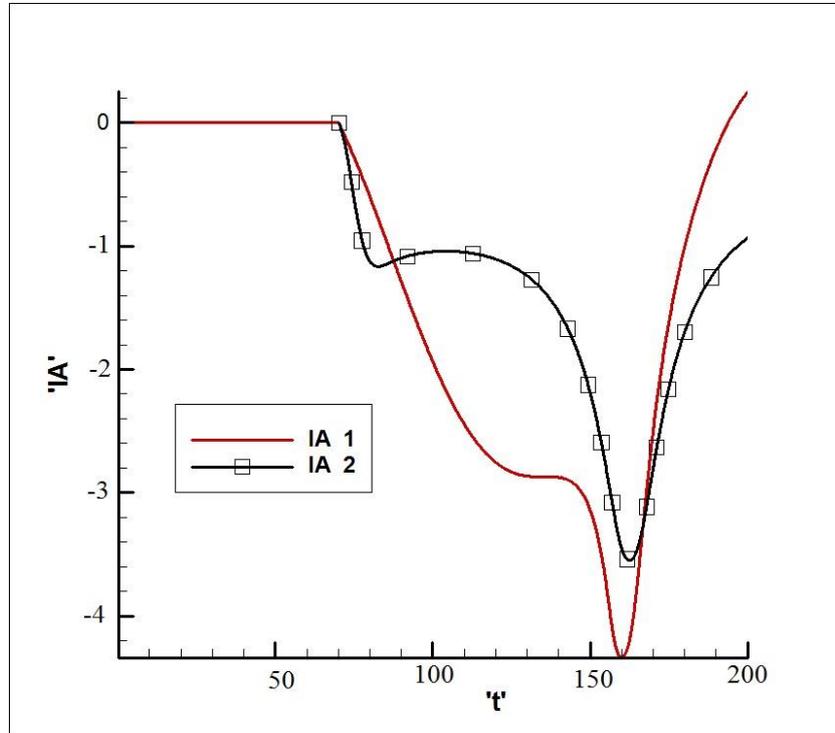
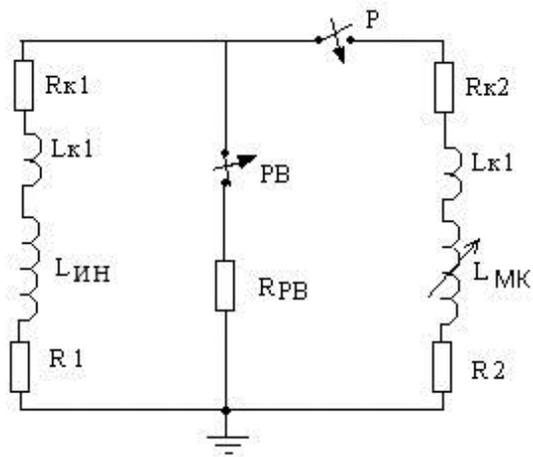


Рис. 1.2. Ток в цепи лайнера (I_A)

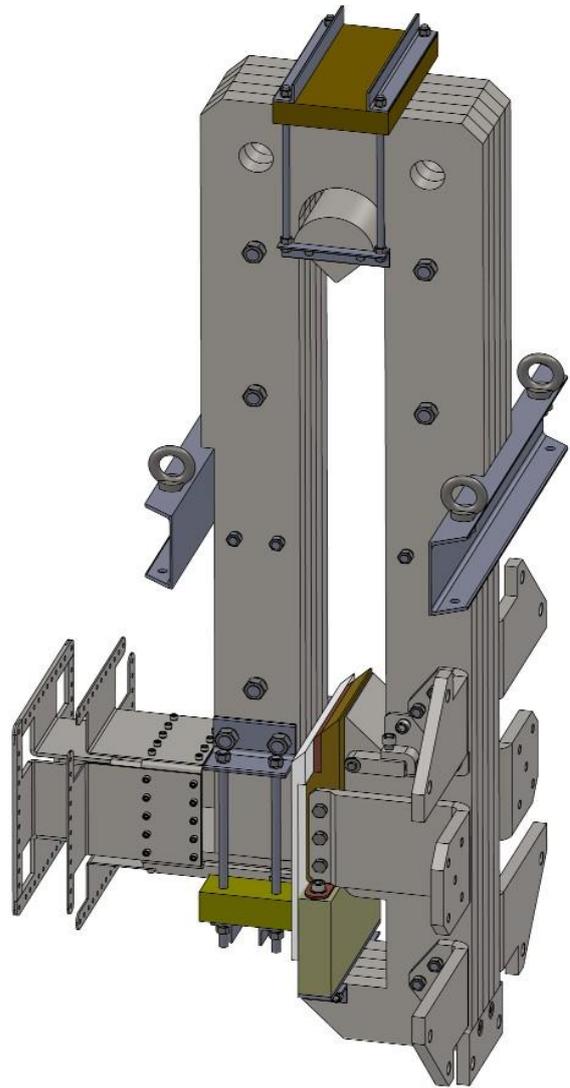
На рис. 1.2 изображены выходные токи в нагрузочном витке МК (время – в микросекундах, ток – в мегаамперах). В первом расчете получен выходной импульс с амплитудой 4,3 МА, во втором – с амплитудой 3,6 МА, в эксперименте ток достигал величины 3,8 МА. По сравнению с расчетами [1] график 2 тока по форме лучше соответствует экспериментальной кривой. Большая крутизна фронта импульса dI/dt обусловлена характеристикой «идеального» выключателя, введенного в расчетную схему. Реальные величины производных токов на графиках 1 и 2 должны соответствовать друг другу, что наблюдается в экспериментальных данных.

1.2. МК в аperiodическом режиме ускоряющего тока, обеспечиваемого ИН

МК предназначен для усиления мощности электрического импульса ИН магнитного усилителя (далее просто ИН) в установке «МОЛ». Амплитуда тока на выходе ИН составляет 4 МА, максимальное напряжение – 30 кВ. Характерное время работы ИН определяется временем срабатывания размыкателей тока на его выходе и составляет величину около 50 мкс (полное переключение тока). В отличие от емкостного накопителя ток ИН не меняет направления (aperiodический режим).



А



Б

Рис. 1.3. А – электрическая схема соединения ИН и МК;
 Б – общий вид ускорительного витка МК установки МОЛ

На рис. 1.3 показана электрическая схема соединения ИН и МК, а на рис. 1.4 – схема МК с присоединенным ИН, использованная в соответствующей математической модели.

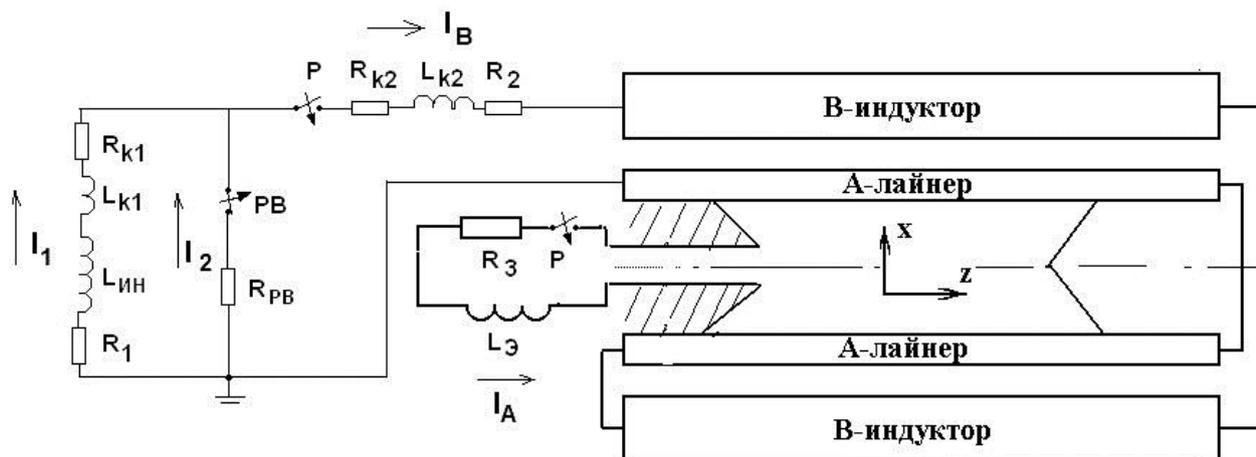


Рис. 1.4. Схема МК с присоединенным ИН, принятая в математической модели

На рис. 1.4 и далее использованы следующие обозначения: I_1 – ток в ИН, I_2 – ток во взрывном размыкателе (далее РВ), I_B – ток в ускорительном контуре (в цепи индуктора), I_A – ток в контуре сжатия (в цепи лайнера); Р – разрядник (напряжение срабатывания равно 5 кВ; принималось, что разрядник срабатывает в момент начала расчетов); $R_1, R_2, R_3, R_{PB}, R_{k1}, R_{k2}$ – сопротивления различных участков цепи; $L_{ИН}, L_{k1}, L_{k2}, L_{Э}$ – индуктивности различных участков цепи.

Для проведения расчетов взяты следующие параметры элементов в установке «МОЛ»:

протяженность МК в направлении оси z $l_z = 1,6$ м;

индуктивность ИН $L_{ИН} = 0,5$ мкГн, сопротивление ИН $R_1 = 2$ мОм;

сопротивление МК (алюминиевый лайнер и медная облицовка 4 м) $R_2 = 0,7$ мОм;

индуктивность нагрузки $L_{Э} = 40$ нГн, сопротивление цепи нагрузки $R_3 = 0,1$ мОм;

соединительная линия ИН–РВ (200 кабелей длиной 9 м) имеет индуктивность $L_{k1} = 15$ нГн и сопротивление $R_{k1} = 0,25$ мОм. Линия включена постоянно. Такие же параметры (L_{k2}, R_{k2}) и у линий РВ–МК, подключаемых в начальный момент времени вместе с МК.

В расчетах использовалась модель движения лайнера в поперечном сечении МК (подробно данная модель описана в работах [4-5]), но для описания электрических цепей применялись следующие уравнения:

$$(L_{ИН} + L_{k1})I_{1,t} + (R_1 + R_{k1})I_1 - R_{PB}I_2 = 0,$$

$$(L_{ИН} + L_{k1})I_{1,t} + L_{k2}I_{B,t} + (R_1 + R_{k1})I_1 + (R_2 + R_{k2})I_B - 2(\chi_B - \chi_A)l_z = 0,$$

$$I_B = I_1 - I_2,$$

$$L_{Э}I_{A,t} + R_3I_A - 2\chi_A l_z = 0.$$

При моделировании работы взрывного размыкателя принималось, что его сопротивление $R_{РВ}$ изменялось во времени по линейному закону. Параметры подбирались таким образом, чтобы время срабатывания размыкателя составило порядка 50 мкс.

Основные предпосылки для расчетов МК с индуктивным накопителем приведены выше. Как и в подразделе 1.1, проведены 2 расчета с вязким лайнером: первый – стандартный, без отключения лайнера от ускорительного витка. Во втором – в момент времени $t_0=70$ мкс в цепи индуктора включался взрывной размыкатель (дополнительное сопротивление, увеличивающееся во времени по линейному закону) для отключения цепи витка. Цепь лайнера замыкалась в момент времени $t_0=70$ мкс. Ниже приведены графики зависимости от времени различных величин (время – в микросекундах, ток – в мегаамперах).

На рис. 1.5 приведены графики токов в индуктивном накопителе I_1 , размыкателе тока I_2 и ускорительном витке I_B в расчете без отключения лайнера от ускорительной цепи (рис. 1.5.А) и с отключением (рис. 1.5.Б)

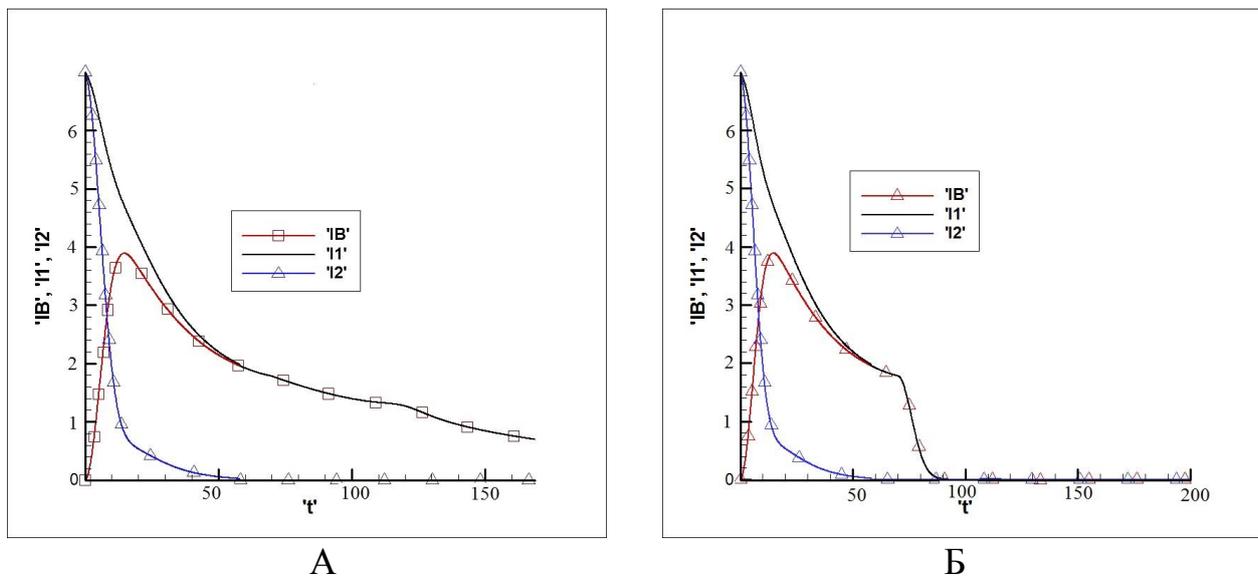


Рис. 1.5. Графики токов ИН, размыкателя тока и ускорительного витка при питании МК на установке МОЛ: А – первый расчет, Б – второй расчет

Из приведенных графиков видно, что время срабатывания РВ составляет порядка 50 мкс (в дальнейшем ток I_2 на данном участке цепи практически равен нулю). Максимальный ток в ИН достигал значения $I_1 = 7$ МА, а максимальный ток, поступающий на вход в ускорительный контур МК, достигал значения $I_B = 4$ МА. Во втором расчете за счет включения дополнительного сопротивления в момент времени $t_0=70$ мкс значения токов I_1 и I_B в цепях ИН и МК за 20 мкс уменьшались практически до нуля (рис. 1.5.Б). Значит использованная модель цепи действительно позволяет моделировать отключение ускорительного контура на этапе сжатия магнитного поля.

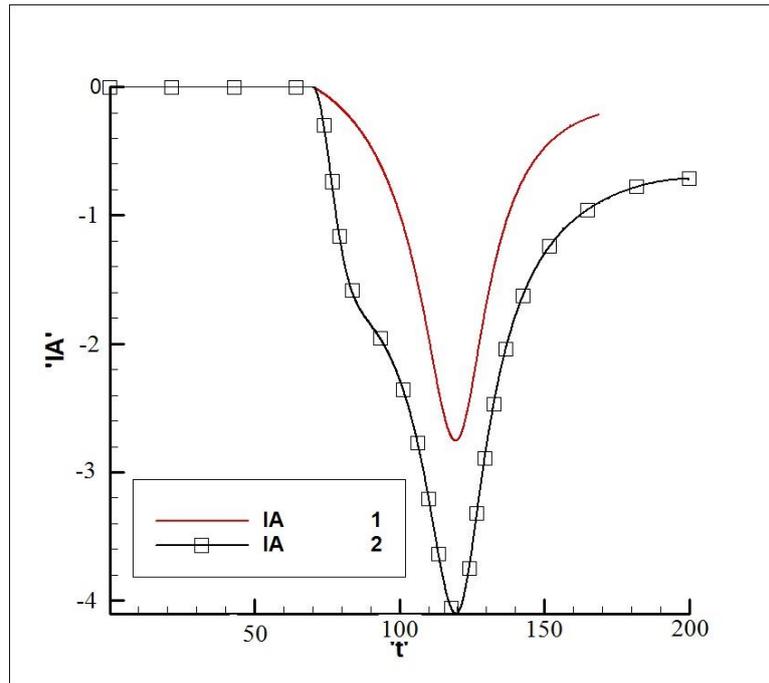


Рис. 1.6. Ток в цепи лайнера I_A в простом случае подключения нагрузки (график 1) и в случае одновременного отключения цепи лайнера от ускорительного витка (график 2)

На рис. 1.6 приведены расчетные графики токов в нагрузке. Как и предполагалось ранее, особенности ускорительной системы с максимумом индуктивности в промежуточной точке перемещения лайнера ограничивают амплитуду тока в простой схеме включения нагрузки. В первом расчете амплитуда тока в выходном импульсе равна 2,8 МА, а отключение ускорительного контура позволило получить во втором расчете импульс с амплитудой 4,1 МА.

При этом динамика перемещения пластин лайнера в обоих случаях практически идентична, что видно по графикам рис. 1.7 (координата центра масс – в сантиметрах). Анализируя эти графики, можно прийти к следующим выводам. Во-первых, в момент остановки и отражения пластин лайнера их взаимные координаты еще далеки от точки физического контакта и расстояние между ними составляет более 1 см. Это говорит об избыточной величине магнитного потока, захватываемого в контур сжатия. Во-вторых, существенно меньшая максимальная величина тока в первом расчете связана с частичным возвратом магнитной энергии в ускорительный виток (и в магнитный усилитель) на стадии максимального сжатия потока.

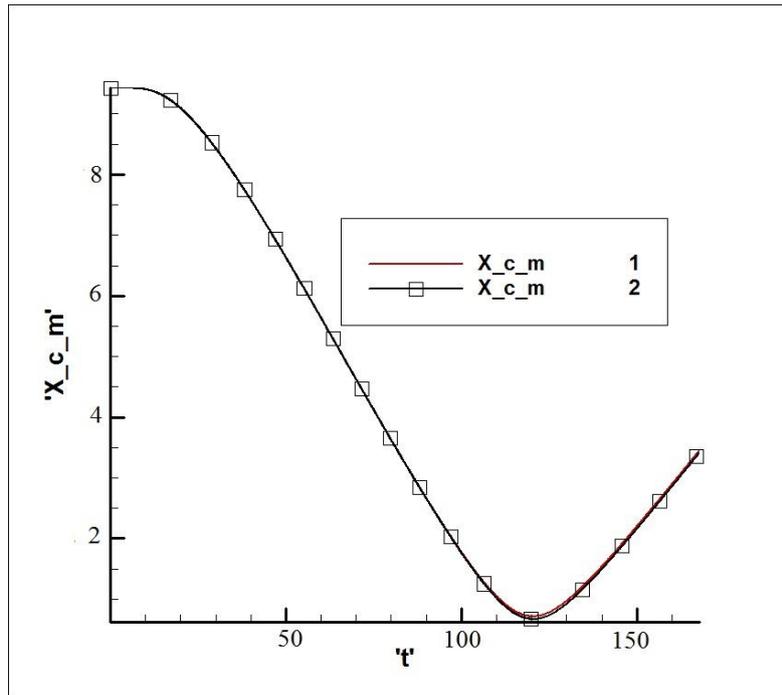


Рис. 1.7. Координата центра масс лайнера

2. Оптимизация расчетных параметров МК с питанием от ИН

Выше и в ранних экспериментальных и расчетных работах [3] неоднократно отмечалось, что частотная характеристика емкостного источника тока, использованного в МК «ПУМА», вынуждает включать цепь нагрузочного витка в конце первого полупериода разряда. Это приводило к появлению пьедестала тока в нагрузке и, как следствие, к длинному фронту тока, составлявшему 30-40 мкс. В цепи питания МК от ИН с апериодической кривой разряда можно получить более крутой фронт тока. Положение точки (и момента времени) захвата магнитного потока следует оптимизировать, добиваясь большей величины отдачи энергии в нагрузочный контур.

Это сделано в заключительной стадии расчетов при выборе момента захвата магнитного потока в моменты $t_0 = 100$ мкс и $t_0 = 110$ мкс. Включение размыкателя, отключающего цепь ускорительной системы от нагрузочного витка, также соответствовало этим временам. На графиках 2.1 и 2.2 показаны токи в цепях лайнера и соответствующие координаты перемещения центра масс лайнера во всех 3 расчетных вариантах с $t_0=70, 100, 110$ мкс.

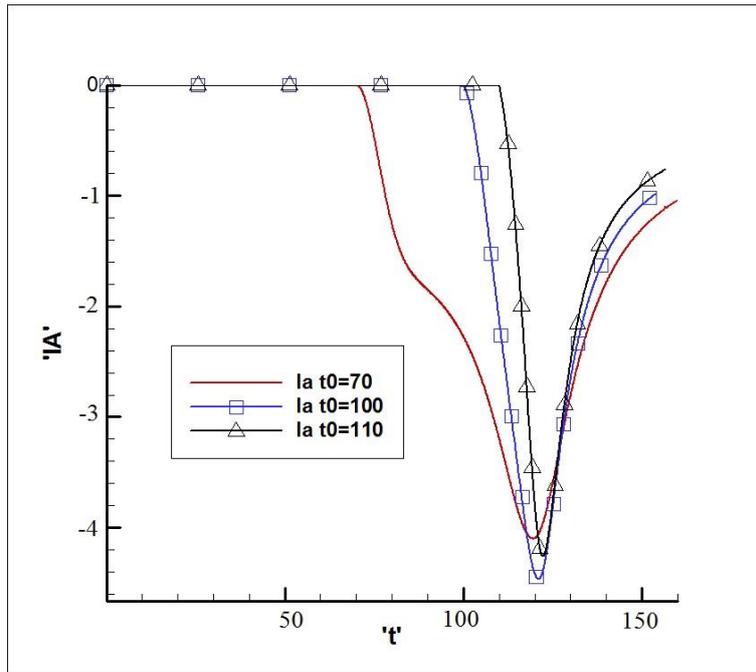


Рис. 2.1. Ток в цепи лайнера I_A при различной величине (при разных временах t_0) захватываемого магнитного потока

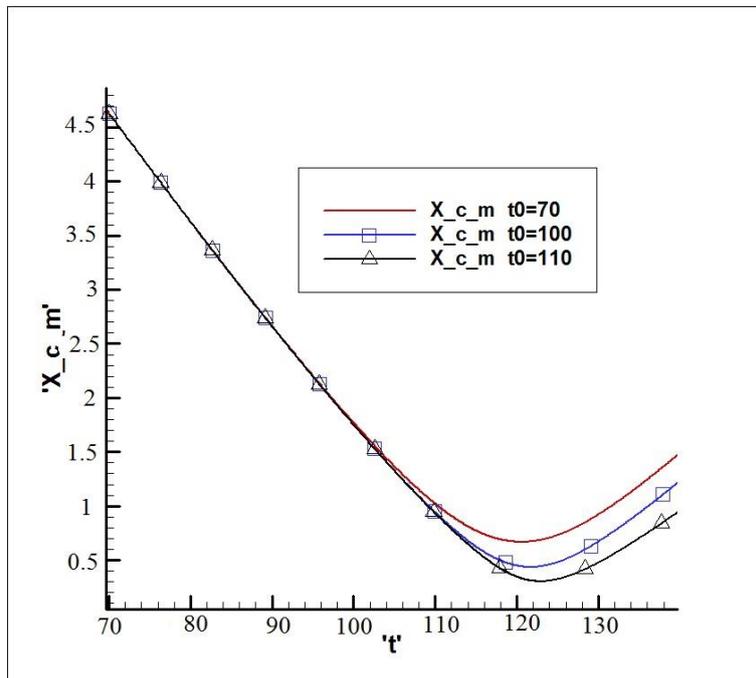


Рис. 2.2. Координата центра масс лайнера

Как следует из сравнения графиков тока на рис. 2.1, оптимальному варианту соответствует величина $t_0=100$ мкс, обеспечивающая максимальную величину тока 4,5 МА при полной длительности фронта (от 0,1 до 0,9 амплитуды) 15 мкс. Время $t_0 = 110$ мкс позволяет сократить фронт до 8 мкс при незначительном уменьшении амплитуды тока до 4,3 МА. Эти данные важны для проектирования

плазменного прерывателя тока (ППТ), являющегося нагрузочным каскадом МК в установке МОЛ.

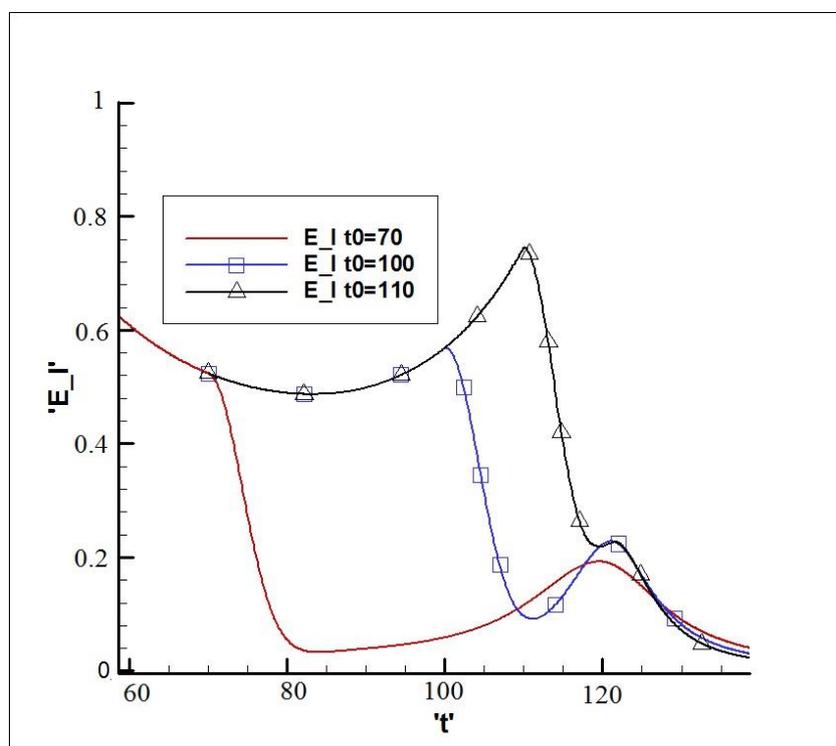


Рис. 2.3. Энергия токов во внешних цепях

В соответствии с данными, приведенными на рис. 2.1, следует ожидать, что длительность фронта в нагрузочном витке можно уменьшать и далее, смещая точку захвата магнитного потока в направлении перемещения пластин. Однако из рис. 2.3 видно, что суммарная энергия токов во внешних цепях МК (ИН и линии электрических соединений) E_I минимальна при $t = 85-90$ мкс, после чего начинает достаточно быстро расти с увеличением времени (для расчетов с $t_0 > 90$ мкс). Этот эффект проявляется ввиду особенностей использования магнитной конфигурации ускорительной системы МК [4], имеющей максимальную индуктивность в промежуточной точке движения лайнера. В данном случае, сопоставляя данные рис. 2.3 и рис. 2.2, можно видеть, что точка равновесия магнитной системы, в которой $dL/dt=0$, соответствует расстоянию $2X_{c_m}$ между пластинами, равному 5-6 см. Более позднему «захвату» магнитного потока предшествует возврат части кинетической энергии в электрический контур ускорения. При этом лайнер частично тормозится естественным образом без сжатия магнитного потока. Таким образом, выбор точки «захвата магнитного потока» – это компромиссное решение между желаемым сокращением фронта тока в нагрузочном витке и величиной максимальной амплитуды тока в нагрузке МК.

3. Особенности и отличия в динамике деформации пластины лайнера

В экспериментах с емкостным питанием МК поперечные деформации лайнера не мешали осуществлять коммутацию нагрузочного контура движущейся пластиной лайнера, несмотря на характерные загибы на концах пластин. Предполагается использовать такой же метод включения нагрузочного контура и в дальнейшем при питании МК от ИН. Для подтверждения такой возможности необходимо убедиться в том, что при измененной апериодической форме ускоряющего тока характер деформаций не имеет существенных отличий от уже известной картины.

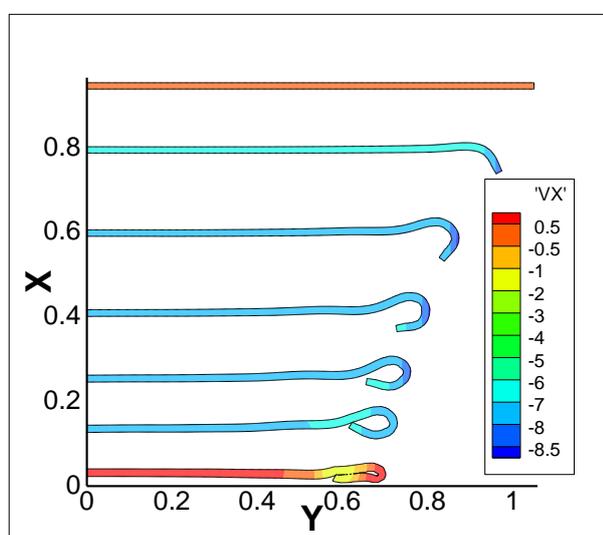


Рис. 3.1. Расчет с емкостным накопителем. Положения лайнера в моменты времени $t = 0; 54; 80; 105; 125; 140; 160$ мкс

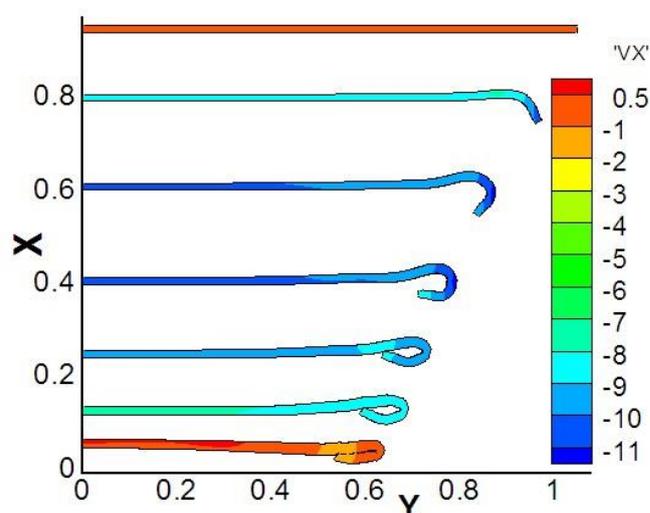


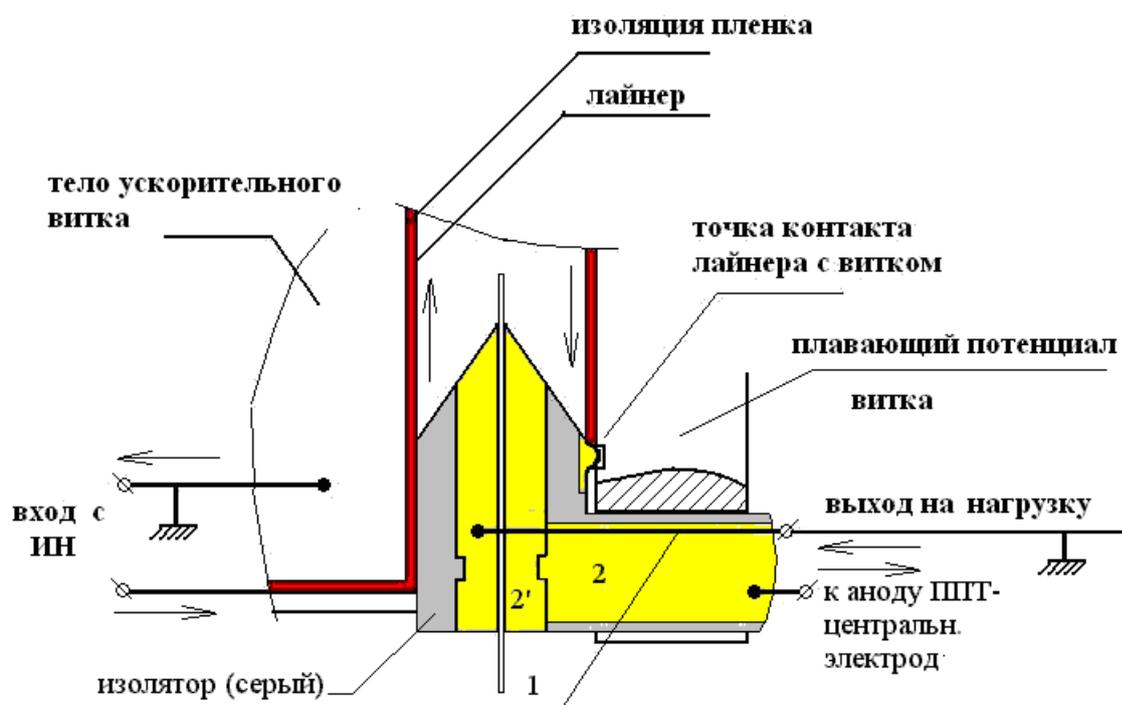
Рис. 3.2. Расчет с индуктивным накопителем. Положения лайнера в моменты времени $t = 0; 36; 56; 76; 92; 106; 120$ мкс

На рис. 3.1 и 3.2 приведены конфигурации деформированного ускоряемого лайнера в различные моменты времени в расчетах с емкостным накопителем (время включения нагрузки $t_0=70$ мкс) и ИН (время включения нагрузки $t_0=100$ мкс). На рисунках цветом показана скорость, нормированная на величину 100 м/с, движение происходит сверху вниз.

Видно, что характер деформаций принципиально не изменился, близкими являются и абсолютные величины, характеризующие изменение размера ширины пластины, в том числе и в момент наибольшего сжатия магнитного потока. При этом использование питания от индуктивного накопителя позволяет получить более высокие скорости движения лайнера. Кроме того, большая плотность тока на концах ленты вызывает более быстрое закручивание краев лайнера.

4. Схемные решения МК с ИН и выводом тока на нагрузку с общей шиной заземления

В целом ряде экспериментальных и расчетных задач, выполненных ранее [1-4] по теме МК, электротехническая схема его соединений могла произвольно меняться в зависимости от поставленной цели. В первых экспериментах нагрузка МК располагалась внутри ускорительного витка [4], являясь его частью. В следующей серии работ [1] нагрузка вынесена за его пределы, но жестко присоединена к выводу витка, находясь под напряжением источника тока. Это нисколько не мешало генерировать в нем токи, измеряемые бесконтактным способом с помощью пояса Роговского и тем более проводить необходимые расчеты.



токопроводы 1 идут по "верху". Пара по бокам тела витка.
токопровод 2 идет внутри "окна" в теле витка

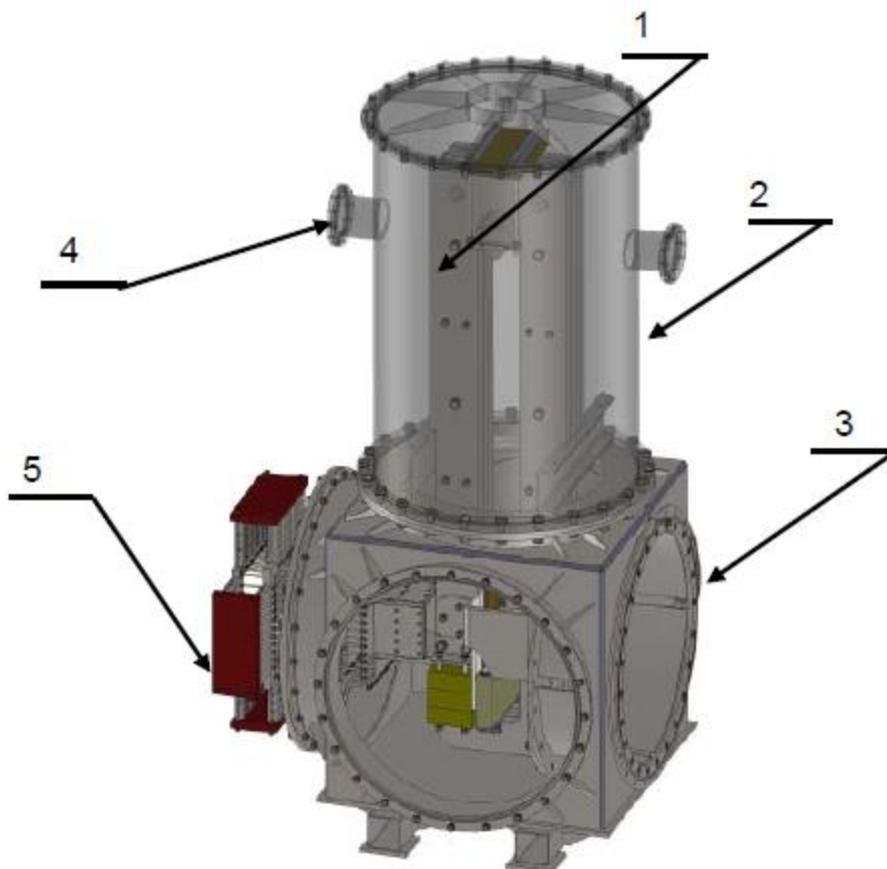
Рис. 4.1. Конструктивное решение узла ввода-вывода электрического тока для варианта питания МК от ИН с последующей передачей энергии в плазменный размыкатель ППТ

В реальной электрической схеме каждый каскад установки МОЛ имеет свой потенциальный вход и выход, а также они должны быть объединены общей земляной (нулевой) шиной. Схема должна иметь возможность обеспечить операции, соответствующие указанным манипуляциям в расчетах, для получения необходимых амплитуд токов и крутизны фронтов в ППТ - нагрузке.

Полагается, что указанные особенности электрической схемы могут быть решены в конструкции, схематично показанной на рис. 4.1.

По сравнению с макетом, задача которого заключалась в выводе тока в произвольно присоединенный виток, входной и выходной каскады системы МОЛ должны иметь выходы, ориентированные по потенциалам и точкам заземления. Как видно из рис. 4.1, с самого начала ускорения лайнера нагрузочный виток соединен с ускорительным витком на половине, противоположной входу тока. Для схемы последовательного соединения лайнера и витка в процессе ускорения величина потенциала на нагрузочном витке равна половине входного напряжения. Это недопустимо при присоединении к МК вместо нагрузочного витка какого-либо реального нагрузочного устройства, имеющего общее электрическое заземление со всеми остальными каскадами установки.

Поэтому в МК стенда МОЛ реализована иная схема присоединения нагрузки, изолирующая в фазе разгона лайнера нагрузочное устройство как от лайнера, так и от ускорительного витка.



- 1 – виток-индуктор, 2 - вакуумная емкость, 3 – стыковочный фланец с вакуумной емкостью ПТН, 4 – патрубки вакуумной откачки, 5 – коллектор для подключения кабелей от КУ

Рис. 4.2. Внешний вид магнитного компрессора (МК).
Разработка эскиза - НИИЭФА им. Д.В.Ефремова.

Показанная схема позволяет создать плавающий потенциал ускорительного витка, определяемый возрастающей индуктивностью лайнера при его ускорении, не заземляя контакты вывода тока раньше, чем начнется генерация выходного токового импульса. Для этого оба вывода лайнера при ускорении отделены от нагрузки диэлектрическими изоляторами. После ускорения лайнера в начале фазы сжатия магнитного потока подключение нагрузки обеспечивается пластинами лайнера, падающими на клиновые поверхности контактного узла. Это относится как к потенциальной шине импульсного питания ППТ, так и к общей шине заземления установки.

В целом каскад МК установки МОЛ предполагается смонтировать в вакуумной камере с полной высотой 3,5 м, как показано на рис. 4.2.

Заключение

Проведенные расчеты динамики лайнера в каскаде МК установки МОЛ показали, что апериодическая форма тока ИН, питающего магнито-компрессионную систему, позволяет получить импульсы тока с заданной амплитудой, превышающей 4,3 МА. Длительность фронта тока при этом может быть сокращена по сравнению с полученной в экспериментах на МК «ПУМА» и ограничена величиной 8-10 мкс. Для оптимизации параметров работы индуктивный накопитель дает более широкие возможности по сравнению с емкостным источником питания, обладающим собственной частотной характеристикой. Динамика поперечных деформаций лайнера не изменилась при изменении формы питающего импульса тока. Это позволяет в реальной установке МК (МОЛ) более широко использовать способ электротехнической коммутации нагрузки движущимся телом лайнера, экспериментально проверенный на макете «ПУМА» с емкостным источником питания.

Список литературы

[1] Экспериментальные и расчетные исследования магнитного компрессора потока с лайнером полоскового типа при питании от емкостного накопителя. Е.В. Грабовский [и др.] // Ядерная физика и инжиниринг. НИЯУ МИФИ. 2013. Т.4. №2. С. 136-145.

[2] Проект «БАЙКАЛ» – отработка схемы генерации электрического импульса. Э.А. Азизов [и др.]. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2001. №3. С.3-17.

[3] A two-stage power amplifier for the MOL stand. E.V. Grabovsky [et. al] // IEEE Transactions on Plasma Science. Special Issue – “Megagauss Magnetic Fields: Production & Application 2010”. V.38 . Part 8. P. 1750-1753.

[4] М.П. Галанин, А.П. Лотоцкий. Моделирование разгона и торможения лайнера в устройствах обострения мощности // Радиотехника и электроника. №2. 2005. С. 256-265.

[5] М.П. Галанин, А.П. Лотоцкий, А.С. Родин, И.А. Щеглов. Движение лайнера в поперечном сечении магнитного компрессора // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. №2. С. 65-84.

[6] М.П. Галанин, М.К. Крылов, А.П. Лотоцкий, А.С. Родин. Математическое моделирование работы магнитного компрессора // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2011. № 5. 30 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-5>

Оглавление

Введение. Общее предназначение и принцип работы МК	3
1. Сравнительные характеристики устройств МК, питаемых от емкостного или индуктивного накопителей	3
1.1. Частотные характеристики, связанные с полупериодом емкостного тока.....	3
1.2. МК в апериодическом режиме ускоряющего тока, обеспечиваемого ИН.....	5
2. Оптимизация расчетных параметров МК с питанием от ИН	10
3. Особенности и отличия в динамике деформации пластины лайнера	13
4. Схемные решения МК с ИН и выводом тока на нагрузку с общей шиной заземления.....	14
Заключение.....	16
Список литературы.....	17