

УДК 533.9 + 621.373.9

## НЕЛИНЕЙНЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ НАГРУЗКИ С ПИТАНИЕМ ОТ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В РЕЖИМЕ РАСТУЩЕЙ МОЩНОСТИ

© 2022 г. А. В. Козлов<sup>1</sup>, А. В. Маштаков<sup>1</sup>, А. В. Шурупов<sup>1</sup>, А. Н. Гусев<sup>1</sup>, В. Е. Завалова<sup>1</sup> \*,  
М. А. Шурупов<sup>1</sup>, Н. П. Шурупова<sup>1</sup>, А. М. Житлухин<sup>2</sup>, В. П. Бахтин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Москва, Россия

<sup>2</sup>АО “Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований” (АО “ГНЦ РФ ТРИНИТИ”), Москва, Россия

\*E-mail: zavalova@fites.ru

Поступила в редакцию 29.04.2021 г.

После доработки 02.09.2021 г.

Принята к публикации 28.09.2021 г.

Приведены экспериментальные и теоретические исследования эффективных источников питания для плазменных нагрузок типа импульсного плазменного ускорителя. Актуальной задачей исследований является повышение мощности источника питания плазменных нагрузок при сохранении условий их согласованной работы и, как следствие, увеличение полного энерговклада в плазменные образования импульсного плазменного ускорителя. Представлены сравнительные характеристики работы ускорителя при использовании источников питания на основе емкостных накопителей и взрывомагнитных генераторов спирального типа с устройством формирования импульса тока. Описана методика, позволяющая путем проведения серии предварительных экспериментов с высоковольтными емкостными накопителями и расчетов по полуэмпирическим моделям отработать оптимальные режимы работы импульсного плазменного ускорителя, чтобы в дальнейшем перейти к взрывным экспериментам с генератором. Целью такого подхода является согласование выходных параметров взрывомагнитных генераторов с динамикой движения плазмы в ускорителе. Представлена серия лабораторных экспериментов по эффективной передаче энергии от взрывомагнитных генераторов к импульсному плазменному ускорителю при уровнях токов в плазменной нагрузке свыше 3.5 МА.

DOI: 10.31857/S0040364422010306

### ВВЕДЕНИЕ

Поиск эффективных источников энергии для современных мощных плазменных установок был и остается актуальной прикладной задачей импульсной электрофизики. Среди практических приложений этого направления: генерация рентгеновского излучения, моделирование и исследование динамики плазменных струй в ионосфере, модификация поверхностей конструкционных материалов, исследования эрозии металлических образцов при воздействии интенсивных потоков плазмы, а также стратегически важные задачи термоядерного синтеза. Для всех этих приложений очень важно решить задачу получения однородных и стабильных высокоэнергетичных плазменных потоков. Решение этой задачи невозможно без повышения мощности источников питания и эффективности передачи энергии от них в нагрузку. Традиционными источниками энергии для плазменных нагрузок являются емкостные накопители (ЕН) [1–6], которые, как правило, представляют собой достаточно масштабные сооружения. Для некоторых импульсных плазменных нагрузок мегаамперного уровня

тока, таких как импульсный плазменный ускоритель (ИПУ) и плазменный фокус, применение источников в виде ЕН не является оптимальным. Поскольку в процессе работы индуктивность таких нагрузок увеличивается, то для поддержания большой амплитуды тока в нагрузке требуется рост мощности источника. Емкостные накопители обладают наибольшей мощностью при наибольшем значении напряжения, поэтому в процессе работы на ИПУ их мощность только падает. В сравнении с ЕН взрывомагнитные генераторы (ВМГ) [7–12] обладают рядом преимуществ. В более ранних исследованиях, в частности в [12], было показано, что максимальная мощность ВМГ достигается в конце его работы, что позволяет поддерживать и даже увеличивать ток в процессе работы ИПУ при существенном изменении его индуктивности. Указанное преимущество позволило эффективно согласовать работу источника питания на основе ВМГ и плазменную нагрузку. Являясь регулируемым источником тока, ВМГ позволяет оптимизировать как процесс переключения тока в нагрузку, так и процесс передачи в нее энергии во избежание слишком больших перенапряжений в нагрузке.

Кроме того, использование в составе ВМГ устройств формирования импульса тока дает возможность управлять темпами ввода энергии в нагрузку, что позволяет избежать перенапряжений и паразитных пробоев [12]. Мощность ВМГ можно увеличить, применяя более эффективные взрывчатые вещества (ВВ), геометрию и принцип намотки спирали генератора, а также сокращая фронт импульса тока за счет синхронизации коммутирующих устройств. В предложенной конструкции ВМГ схема формирования импульса тока включает в себя взрывной размыкатель, твердотельный замыкатель и регулируемую остаточную индуктивность ВМГ, перестройка которой обеспечивает рост мощности источника питания на завершающей стадии работы ВМГ [12, 13]. Переменная нелинейная составляющая импеданса нагрузки генератора определяется движущимися в пределах электродной системы ИПУ плазменным образованием и имеет индуктивный характер. В расчетных моделях это плазменное образование принято называть токовой оболочкой. Динамика движения токовых оболочек отличается ускоренным движением под действием собственного магнитного поля, которое сопровождается увеличением скорости роста индуктивности.

Данная работа является продолжением предыдущих исследований, результаты которых представлены в [12–14]. Моделирование и расчет были дополнены уравнением для динамики изменения сосредоточенной массы токовой оболочки, а эксперименты – параллельной схемой подключения двух ИПУ. Сравнение экспериментальных и расчетных распределений токов, напряжений и подведенной к нагрузке мощности показало их хорошее согласие вплоть до момента распада токовой оболочки. Измеренные амплитуды тока в нагрузке составили порядка 3.5 МА, фронт импульса тока – до 12 мкс, а увеличение эффективности передачи энергии позволило довести энергию плазменного потока до 0.5 МДж, что почти в пять раз превышает результат, полученный ранее в [12]. В работе приводятся обоснования применения полуэмпирической модели расчета параметров ИПУ и предложенной методики исследований, в том числе с учетом результатов исследований других авторов. Ключевой идеей применяемой методики является первичная отработка режимов работы плазменной нагрузки при питании от емкостных накопителей. Поскольку емкостные накопители не являются разрушаемыми в процессе эксперимента, то их применение обеспечивает возможность проведения серии экспериментов, в которых уровень подведенной мощности к нагрузке можно варьировать изменением зарядного напряжения. Таким образом, можно наработать данные об особенностях режимов работы нагрузки в зависимости от параметров пуска. При проведении серии экспериментов с емкостным накопителем методом последовательного приближения

выбирается режим работы конкретной плазменной нагрузки, характеризующийся максимальной нагрузкой ускорителя рабочим газом, но при этом исключая пробой ускорителя по изолятору. Далее можно переходить к созданию ВМГ, который обеспечит в нагрузке амплитуду тока, аналогичную подобранной. Используя такой алгоритм экспериментальных исследований, можно количество дорогостоящих экспериментов с запиткой ИПУ от ВМГ свести к минимуму.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОТРАБОТКИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИПУ

Экспериментальная база исследования передачи энергии в нагрузку позволяет проводить отработку режимов запитки плазменной нагрузки как от емкостных накопителей, так и от взрывомагнитных генераторов переошиновкой нагрузки на токосборник ВМГ. На рис. 1 представлено фото экспериментальной сборки. В центре – плазменные ускорители коаксиального типа с токосборниками. Слева – зарядные и коммутирующие устройства для двух емкостных накопителей, находящихся в соседних комнатах: ЕН1 ( $U = 24$  кВ,  $C = 1$  мФ, энергией около 290 кДж) и ЕН2 ( $U = 36$  кВ,  $C = 576$  мкФ, 370 кДж). Для отработки режимов работы с применением ЕН1 и ЕН2 было проведено усовершенствование системы коммутации токов мегаамперного диапазона в твердотельном разряднике с блоком поджига [15]. Разрядник обладает задержкой времени срабатывания в пределах 5.5 мкс, при этом нестабильность (джиттер) времени срабатывания не превышает 500 нс. Секционированием и распараллеливанием подводных и отводящих кабельных линий удалось добиться общей их эффективной индуктивности от емкостного накопителя до нагрузки в пределах 15 нГн. Возможность применения ВМГ в лабораторных условиях была обеспечена взрывозащитными камерами “Титан” (разрешенный вес ВВ – до 11 кг) и “Глобус” (разрешенный вес ВВ – до 8 кг). ВМГ запитывается начальной энергией от батареи конденсаторов ( $U = 36$  кВ,  $C = 96$  мкФ, 62 кДж). Экспериментальная установка включала батареи конденсаторов для питания систем формирования квазистационарных магнитных полей ПУ и создания тормозного поля магнитной пробки. В ускорителе рассматриваемого типа используются системы импульсно-газонапуска и создания вакуума в ИПУ порядка  $10^{-5}$  мм рт. ст. Для управления экспериментом стенд укомплектован автоматизированной системой управления и сбора экспериментальных данных.

Поведение плазменной нагрузки, в данном случае ИПУ, определяется его устройством и принципом работы. Основными элементами коаксиального ИПУ являются два коаксиальных электрода: центральный – катод (длина около 700 мм), внешний –

анод (длина около 800 мм). Входные диаметры — около 190 и 270 мм соответственно. В промежутке между ними через систему отверстий в центральном электроде при помощи быстродействующего электродинамического клапана напускается дозированное количество рабочего газа — водорода. Плазменная оболочка формируется благодаря пробую и ионизации рабочего газа при подаче на электроды высокого напряжения. После формирования плазменной оболочки контур нагрузки замыкается. Ускорение плазменного сгустка происходит под действием силы Ампера, возникающей вследствие взаимодействия радиальной составляющей электрического тока в плазме между электродами ИПУ и собственным магнитным полем в контуре с током.

В состав ИПУ входит система соленоидов для создания внешнего квазистационарного магнитного поля. Внешний соленоид наматывается на внешний электрод, длина которого больше внутреннего электрода. Такая конструкция позволяет сформировать более симметричный внешний слой плазменной оболочки и снижает взаимодействие плазмы со стенками электрода. В конце ускорителя примерно на расстоянии 1 м от коллектора располагается диагностическая секция или обзорное окно. За выходным окном ИПУ устанавливается поворотное широкоапертурное зеркало для передачи изображения межэлектродной области в электронно-оптическую камеру, осуществляющую оптическую диагностику.

На первом этапе нарабатывались экспериментальные данные о динамике изменения индуктивности плазменной нагрузки. В предположении коаксиальной симметрии они давали информацию об оценке положения и динамике движения токовой оболочки. По данным о движении токовой оболочки в дальнейшем определялись необходимые выходные параметры ВМГ при его работе на исследуемую нагрузку. Для вычисления зависимости индуктивности нагрузки от времени использовалось

соотношение  $L(t) = \frac{\int U(t) dt}{I(t)}$ , что справедливо в предположении малости активной части импеданса нагрузки.

По проведенным оценкам, индуктивная часть импеданса превышает активную часть как минимум на порядок. Далее, зная геометрию электродов и, соответственно, зависимость индуктивности нагрузки от положения токовой оболочки, можно определить динамику движения последней. На динамику как формирования, так и движения токовой оболочки кардинальным образом влияет начальное газовое распределение, зависящее от режима импульсного газонапуска, и распределение квазистационарных магнитных полей, которые регулируются зарядными напряжениями и синхронизацией соответствующих емкостных накопителей. Регистрация токов в цепях производилась пояса-



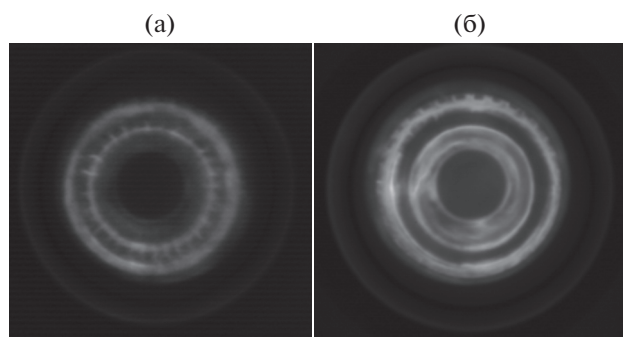
Рис. 1. Фото экспериментальной установки.

ми Роговского с последующим численным интегрированием данных с учетом чувствительности каждого пояса. Напряжение на нагрузке измерялось независимо с помощью делителя напряжения.

#### ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ПОЛУЭМПИРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ТОКОВОЙ ОБОЛОЧКИ И ЕЕ ВЕРИФИКАЦИЯ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Полуэмпирическая модель движения токовой оболочки создавалась в помощь инженерному и конструкторскому проектированию для предварительных оценок распределений импульсных тока и напряжений и для обеспечения дальнейших экспериментальных исследований. Модель включала конструкторские и схемотехнические решения, учитывала эмпирические зависимости для нелинейных элементов. Использование приближения сосредоточенной плазменной оболочки помогает анализировать движение области, связанной с разрядным током, в которой сосредоточено магнитное поле. Применяемое приближение сосредоточенной массы токовой оболочки позволило привести модель к одномерной задаче и согласовать экспериментальные данные с расчетными значениями. Реальная форма токовой оболочки неоднородна по радиусу. Вследствие коаксиальной геометрии пространственная неоднородность магнитного поля приводит к тому, что пондеромоторная сила у внутреннего электрода выше, чем у внешнего электрода. Однако эффект Холла вблизи внутреннего электрода частично выравнивает форму токовой оболочки в этой области. Поэтому положение токовой оболочки определяется по средней координате при условии не слишком сильной ее деформации. Несмотря на упрощение модели, она хорошо зарекомендовала себя в задаче согласования плазменного ускорителя с источниками питания различного типа. Представляется возможным зафиксировать динамику изменения полного магнитного

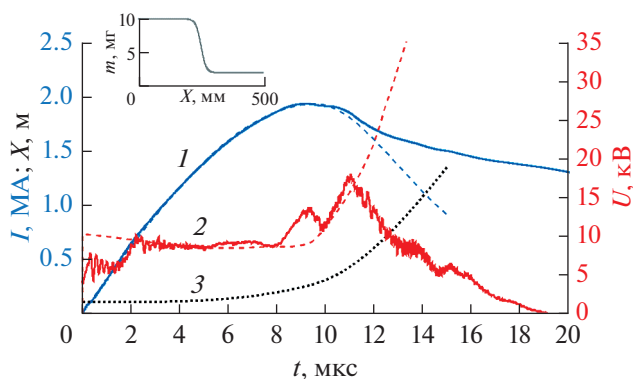
потока в пределах электродной системы ускорителя. Зная при этом полный ток, в предположении сосредоточенной массы оболочки с определенной точностью можно определить динамику изменения положения оболочки. Именно под эту экспериментальную динамику подстраивается полупирическая модель расчета. Как будет показано ниже, данное приближение хорошо согласуется с экспериментальными данными вплоть до максимума тока. Однако стоит отметить, что использование описанной модели предполагает достаточно высокую степень цилиндрической симметрии начального пробоя электродного промежутка и движения токовой оболочки, что важно само по себе и экспериментально исследовалось при отработке конструкции ИПУ и системы газонапуска. Визуализация токовой оболочки с использованием электронно-оптической камеры, проводимая через окно диагностической секции на выходе ИПУ, позволяла наблюдать за формированием и движением токовой оболочки между электродами ускорителя и судить о степени его симметричности. Пример подобной съемки представлен на рис. 2. Основными данными, получаемыми при съемке разряда, являются данные о симметрии процесса ускорения оболочки. При формировании оболочек температура может составлять несколько электрон-вольт, причем более холодные части оболочки выглядят ярче, чем более горячие. Это происходит потому, что основная часть мощности, излучаемой горячими зонами плазмы, находится в ультрафиолетовой области, а следовательно, она не может быть зарегистрирована системой регистрации для оптического диапазона спектра. На рис. 2а видно формирование единой оболочки из множества проводящих каналов. На рис. 2б зарегистрирована сформированная токовая оболочка на момент выхода из электродной системы. Регистрация осуществлялась восьмикадровой электрооптической камерой при экспозиции 200 нс, временном шаге 2.5 мкс и пространственном разрешении 1 Мп.



**Рис. 2.** Фото плазменных образований в межэлектродном промежутке, полученные при высокоскоростной оптической регистрации: (а) – первый кадр, (б) – последний кадр примерно через 8 мкс.

Видно, что плазменная оболочка сохраняет осесимметричность в процессе движения. Данная съемка, по сравнению с приведенной в [5], позволяет более детально визуализировать стадии формирования и ускорения токовой оболочки. Это стало возможным благодаря значительно более короткой экспозиции камеры по сравнению с применяемой в [5] камеры PhantomVEO710S (минимальная экспозиция – 1.5 мкс). Следует отметить, что сформированная токовая оболочка в завершающей стадии работы ИПУ обладает распределенным свечением в пространстве между электродами (рис. 2б) и ее поведение согласуется с наблюдениями, полученными в [6].

Самосогласованная электродинамическая задача разряда емкостного накопителя на нагрузку, включающая характеристики внешней электрической цепи, была дополнена изменением массы плазменной оболочки, обоснованной в [16], и впервые апробирована в [14]. Применимость модели верифицирована собственными экспериментами и сравнением с данными других авторов приведенных публикаций. При известной геометрии электродной системы ускорения токовой оболочки  $a$  зависит от текущего по ней тока  $I$ , производной индуктивности  $L$  по координате  $x$  на данном участке электродной системы и массы оболочки:  $a(x) = I^2 (dL/dx) / 2m(x)$ . Рост тока приводит к резкому разгону токовой оболочки, а также к увеличению индуктивности нагрузки. Зависимость массы токовой оболочки по длине  $m(x)$ , принятая в расчете, имеет вид пологий ступеньки (рис. 3, в верхнем левом углу). Указанная зависимость уточнялась сравнением расчетных и экспериментальных распределений тока и напряжения при питании ИПУ от емкостных накопителей [14]. При развитии разряда деформация токовой оболочки за



**Рис. 3.** Сравнение экспериментальных (сплошные линии) и расчетных (штриховые) значений тока ( $I$ ) и напряжения ( $U$ ) на нагрузке при запитывании энергией ИПУ от емкостного накопителя ( $U = 36$  кВ,  $C = 576$  мкФ): 3 – положение токовой оболочки  $X(t)$ ; в левом верхнем углу – зависимость массы токовой оболочки от ее положения.

счет большего ускорения массы у внутреннего электрода приводит к течению тока оболочки параллельно электродной системе. Последнее обусловливает наличие пондеромоторной силы, направленной к внешнему электроду. В зарубежной литературе этот тип неустойчивости известен как “blowby instability”. Он приводит к резкому изменению массы токовой оболочки и ее последующему ускорению, что схематично показано на рис. 4.

Таким образом, для каждого конкретного ускорителя в серии предварительных экспериментов производится верификация полуэмпирической модели ускорения токовой оболочки. Далее эта модель используется для предварительного расчета пуска с использованием ВМГ в качестве источника питания. Пример расчетных и экспериментальных данных по динамике тока и напряжения для пуска от емкостного накопителя представлены на рис. 3.

Сравнение графиков динамики тока показывает хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений на стадии роста тока, которая является самой важной с точки зрения согласования источника питания и нагрузки. При этом максимально достижимая амплитуда тока до момента ее резкого спада (“распад оболочки”) оказывается наиболее важным значением на практике. После этого момента, как правило, существенно увеличить магнитную энергию в системе не представляется возможным ввиду резкого ускорения токовой оболочки. Таким образом, фактическая задача эксперимента сводилась к достижению максимальной амплитуды тока до начала резкой перестройки индуктивности нагрузки. Основным параметром, варьируемым в полуэмпирической модели, была динамика изменения (сброса) массы в зависимости от положения оболочки. Возможность ее определения из экспериментов с емкостным накопителем позволила провести модельные расчеты, с высокой степенью точности совпадающие с экспериментальными данными. Это дало возможность согласовать разработанный источник питания на основе ВМГ с отработанным ускорителем. Что касается отличий расчетных и экспериментальных значений напряжения, то, во-первых, наличие индуктивности ошиновки и разрядника между емкостным накопителем и электродной системы всегда трудно учесть в расчетах, во-вторых, немонотонность изменения напряжения является неотъемлемым признаком движения (с ускорением) токовой оболочки при отсутствии резкого изменения тока. Это создает компоненту  $IdL/dt$  для изменения магнитного потока в пределах электродной системы, что сопровождается увеличением напряжения на ее входе. При этом ток в системе ввиду ее индуктивности (как электродной системы ускорителя, так и внешней цепи) резко измениться не может. Таким образом, увеличение напряжения на токо-сборнике ускорителя связано с перекачкой маг-

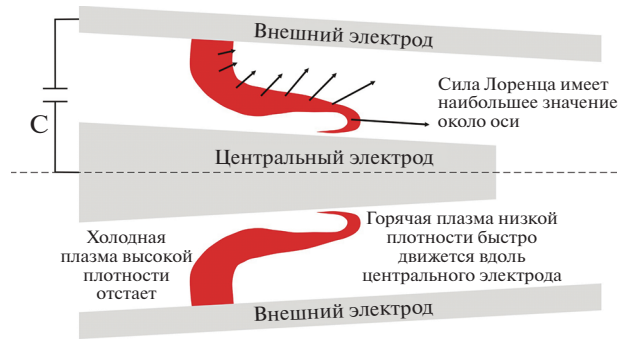


Рис. 4. Иллюстрация деформации токовой оболочки.

нитного потока из внешней по отношению к ускорителю цепи в зазор ускорителя при смещении оболочки.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ИПУ ОТ ВМГ И СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАМИ

Электротехническая схема работы ВМГ на переменную нагрузку ИПУ показана на рис. 5. Коаксиальный плазменный ускоритель ИПУ, в котором осуществляется движение плазменного образования в пространстве между катодом и анодом, посредством кабельной линии соединяется с лабораторным образцом ВМГ. ВМГ помещается во взрывозащитную камеру (ВК). Нагрузку для источника можно условно разделить на переменную часть индуктивного типа (движение оболочки в пределах электродной системы ускорителя) и постоянную (паразитные составляющие). Начальный магнитный поток в ВМГ формируется от емкостного накопителя. Далее сжатие магнитного потока осуществляется движущимся медным лайнером под действием продуктов детонации ВВ. Обязательным элементом ВМГ при питании ИПУ является устройство формирования импульса тока, которое включает в себя два коммутатора  $\phi$  – твердотельный замыкатель и размыкатель. Их временная диаграмма работы согласовывается с выводом остаточной индуктивности из контура ВМГ и динамикой движения токовой оболочки в пределах электродной системы ускорителя. Таким образом, реализуется двухстадийный ввод энергии в нагрузку – первичное переключение тока взрывным размыкателем и вывод остаточного магнитного потока из ВМГ в нагрузку. Именно последняя стадия работы ВМГ определяет растущую мощность источника питания на его основе. На рис. 5 приняты обозначения:  $C_0$  – емкость источника начальной энергии (ИНЭ), запитывающего ВМГ;  $S$  – ключ замыкателя цепи запитки ВМГ;  $S_c$  – ключи замыкателя цепи ВМГ при движении лайнера и подключения цепи на нагрузку;  $I_{emg}$  и  $L_{emg}$  – ток цепи ВМГ и индуктивность ВМГ;  $L_{pas}$  и  $R_{pas}$  – пассивные (паразитные) индуктивность и омическое сопротивление цепи нагрузки;  $I_L$  – ток нагрузки

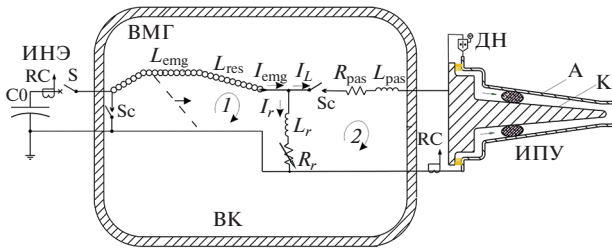


Рис. 5. Электрическая схема при питании ИПУ от ВМГ.

(ускорителя),  $L_r$  и  $R_r$  – индуктивность и омическое сопротивление размыкателя,  $I_r$  – ток через размыкатель; RC – пояса Роговского; ДН – делитель напряжения. Между анодом (А) и катодом (К) желтым цветом показана изоляция. Стрелкой слева показано движение лайнера, замыкающего обмотку спирали ВМГ. Стрелки справа – движение токовой оболочки.

До подключения нагрузки к ВМГ токовый контур  $I$  короткозамкнут через взрывной размыкатель. Это существенно упрощает вид уравнений для его

расчета. После подключения нагрузки ток течет по обоим контурам  $1$  и  $2$ , при этом в расчетной модели учитывается экспериментальная динамика сопротивления взрывного размыкателя во времени. После преобразований исходных уравнений Кирхгофа система приводится к итоговой системе дифференциальных уравнений, описывающих работу индуктивного накопителя на плазменную нагрузку. Таким образом, численный расчет учитывает как наличие нелинейного элемента в цепи источника питания, так и нелинейную динамику изменения импеданса нагрузки. Это позволяет решить само согласованную задачу работы ВМГ на переменную плазменную нагрузку. При этом динамика изменения сопротивления взрывного размыкателя и динамика изменения массы токовой оболочки  $m(x)$  при данном значении  $x$  верифицируются по полученным экспериментальным данным с емкостными накопителями. Применение приближения оболочки с сосредоточенной массой позволяет свести уравнения к одномерной модели, что существенно упрощает проведение серии расчетов и оптимизацию конструкции ВМГ под конкретную нагрузку. В итоговой системе уравнений

$$\begin{cases} \frac{dI_r}{dt} = \frac{-I_r \left[ \left\{ R_r + f \frac{dL_{emg}}{dt} \right\} (L_L + L_r) + L_L R_r \right] - I_L \left[ L_r \left( R_{pas} + \frac{dL_L}{dx} \frac{dx}{dt} \right) - L_L R_r \right]}{L_{emg} (L_L + L_r) + L_L L_r}, \\ \frac{dI_L}{dt} = \frac{R_r I_r + L_r \frac{dI_r}{dt} - I_L \left( \frac{dL_L}{dt} + R_{pas} + R_r \right)}{L_L + L_r + L_{pas}}, \\ \frac{dx}{dt} = v, \\ \frac{dv}{dt} = \frac{I^2 \frac{dL_L}{dx}}{2m} \end{cases}$$

$v$  и  $m$  – скорость и масса токовой оболочки соответственно;  $f = \ln \left( \frac{I_L}{I_{emg}} \right) / \ln \left( \frac{L_{res} + L_L}{L_L} \right)$  – коэффициент совершенства ВМГ, который отражает степень сохранения магнитного потока в системе;  $L_{res}$  – остаточная индуктивность ВМГ;  $L_L$  – индуктивность нагрузки. Типичное значение коэффициента совершенства для генератора – 0.85–0.9 [12].

Разработанная модель позволяет согласовать режим ввода тока в нагрузку с динамикой движения токовой оболочки при варьировании параметров нагрузки, конструкции ВМГ и взрывного размыкателя в широком диапазоне. Основными параметрами, варьируемыми для согласования режима ввода энергии в нагрузку, являются моменты срабатывания взрывных размыкателя и замыкателя,

значение и время выборки остаточной индуктивности ВМГ. Конкретные характеристики различных узлов конструкции уточняются с использованием экспериментальных данных, полученных в предыдущих экспериментах или в дополнительных модельных пусках. К полуэмпирическим зависимостям относятся: зависимость массы оболочки от координаты, зависимость сопротивления взрывного размыкателя ВМГ от времени и распределение коэффициента совершенства ВМГ по длине спирали.

Расчет работы ВМГ производился в два этапа. Первый этап моделирования требует предварительного расчета динамики вывода индуктивности ВМГ. В данной работе производился расчет индуктивности реального ВМГ по чертежу. Это отличает модель от применяемых другими

авторами приближенных аналитических зависимостей или численных расчетов по приближенным геометрическим моделям [7–12]. Для расчета использованы возможности численного комплекса FEMM 4.2 с открытым исходным кодом. Этот комплекс позволяет производить двумерные стационарные расчеты магнитных полей на постоянной частоте методом конечных элементов с использованием скриптов для перестройки расчетной геометрии. Указанные возможности позволили вычислить индуктивность ВМГ для каждого положения лайнера. Положение лайнера задавалось по соответствующим экспериментальным данным. Итоговый вывод индуктивности  $L_{\text{emg}}(t)$  [13] используется в численных расчетах электротехнической схемы работы генератора на нагрузку по построенной модели. Зависимость сопротивления размыкателя от времени аппроксимируется по экспериментальным данным функцией вида  $R_r = R_0 \exp\left(\left(\frac{r}{r_0}\right)^k \ln(n)\right)$ , где  $R_0$  – начальное сопротивление размыкателя при температуре  $T_0$ ,  $k$  и  $n$  – коэффициенты аппроксимации [14]. Эта зависимость применима при реализации переключения до момента, когда алюминиевая фольга во взрывном размыкателе нагревается током ВМГ до температур плавления. Для использованной геометрии это соответствует токам отключения 2.5–3 МА. Динамика изменения указанного сопротивления определяет процесс переключения тока в нагрузку.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЯ

На рис. 6 представлены результаты расчетных и экспериментальных данных динамики тока и напряжения при питании ИПУ от ВМГ после отработки режимов с использованием ЕН для верификации модели. Построенная модель хорошо описывает динамику движения оболочки вплоть до максимума тока, как и в случае с емкостным накопителем (см. рис. 3). После указанного момента результаты моделирования и эксперимента существенно расходятся. Однако, как показывает анализ временной диаграммы работы ВМГ в эксперименте, к моменту достижения максимума тока генератор уже закончил работу и полностью выработал свою индуктивность. Поэтому расхождения эксперимента с моделью сосредоточенной массы оказываются несущественными с точки зрения согласования работы ВМГ и исследуемой нагрузки.

Одним из важных направлений исследований была минимизация индуктивности нагрузки для ВМГ, которая достигалась применением параллельной схемы включения двух ИПУ. Синхронная работа ускорителей была обеспечена подбором режимов работы каждого ускорителя с применением емкостных накопителей, электрическая цепь

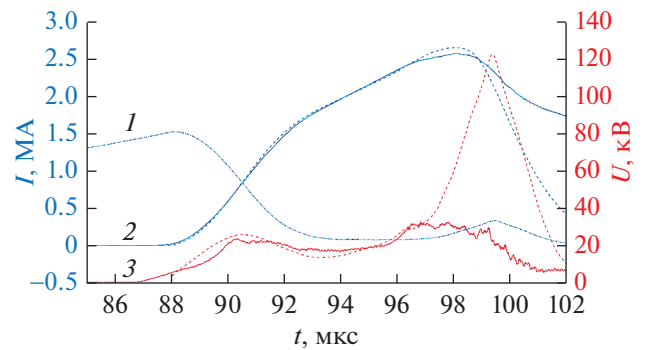


Рис. 6. Сравнение расчетных и экспериментальных данных динамики тока (1, 2) и напряжения (3) при питании ускорителя от ВМГ: сплошные кривые – эксперимент, пунктир – расчет; 1 – ток размыкателя (ВМГ); 2 – ток нагрузки.

которых содержала разработанные в лаборатории сильноточные коммутационные элементы – твердотельный и воздушный разрядники.

Для минимизации индуктивности нагрузки и увеличения КПД источника тока была применена параллельная схема подключения двух ИПУ к единому токосборнику. Режим работы взрывного размыкателя подбирался исходя из осуществления переключения при токе ~1–1.5 МА. Таким образом, реализуется режим с явным вытеснением остаточного магнитного потока в нагрузку после переключения тока. После переключения остаточная индуктивность ВМГ остается значительной (порядка 180–200 нГн) и ее выборка занимает 5–6 мкс. При этом процесс перекачки остаточного магнитного потока в нагрузку происходит согласованно с динамикой увеличения индуктивности последней. Результаты экспериментов представлены на рис. 7. Суммарный измеренный ток в нагрузке составил более 3.5 МА. Подготовка данного пуска проводилась по описанной выше методике с применением ЕН.

В этом режиме наиболее четко прослеживается усиление тока в нагрузке до 3.8 МА при перестройке остаточной индуктивности ВМГ после переключения тока в нагрузку. Причем основная фаза работы ИПУ проходит при растущей мощности ВМГ. Оценки вложенной мощности по полученным распределениям тока и напряжения в нагрузке дают пиковое значение мощности около 27 ГВт. При этом энергия, переданная от ВМГ к ускорителям, достигает 0.5 МДж.

Надо отметить, что данные от исходных осциллограмм сглаживались с применением метода следящего среднего как для данных с пояса Роговского, так и для данных с делителя напряжения. Данные с пояса Роговского дополнительно интегрировались для восстановления амплитуды тока по его производной. Последнее обуславливает гладкость осциллограмм тока. Экспериментальные пуски отличаются уровнем шумов ввиду различных

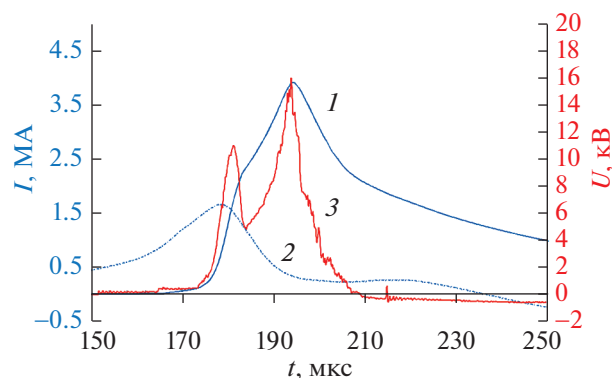


Рис. 7. Полученные в эксперименте импульсные токи и напряжения: 1 – суммарный ток в нагрузке, 2 – ток через размыкатель ВМГ, 3 – напряжение на нагрузке.

режимов срабатывания твердотельного разрядника и работы коммутационной системы ВМГ. Частотные диапазоны шумов также немного различны ввиду конструктивных особенностей ошиновки накопителя и вывода энергии из ВМГ. Как минимум длины ошиновки накопителя и коаксиального вывода энергии из ВМГ отличаются на порядок.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение емкостных накопителей для первичной обработки режимов плазменной нагрузки в совокупности с расчетами по полуэмпирической модели было обусловлено, в первую очередь, высокой стоимостью взрывных экспериментов с ВМГ. Нарботка экспериментальных данных о нелинейных режимах работы нагрузки позволяет осуществить ее эффективную запитку от ВМГ. Определение необходимой остаточной индуктивности ВМГ и момента срабатывания взрывного размыкателя облегчает решение задачи согласования источника питания с нелинейной нагрузкой на этапе проектирования ВМГ.

Основные результаты представленных в статье исследований следующие.

– Реализован режим переключения тока от ВМГ к двум параллельно подключенным коаксиальным ИПУ с передачей энергии в нагрузку до 0.55 МДж при максимальном токе до 3.8 МА.

– Доработано устройство формирования импульсного тока в нагрузке, входящее в состав ВМГ.

– Достигнуты совпадения результатов расчета динамики тока в нагрузке с измеренными фронтами вплоть до максимальных значений, что является принципиально важным для дальнейших исследований, направленных на увеличение полного энерговклада в плазменные образования.

– Показано, что предложенная методика может успешно применяться для согласования ВМГ с любыми импульсными плазменными нагрузками.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваленко Д.В., Климов Н.С., Житлухин А.М. и др. Получение потоков аргоновой плазмы и преобразование их энергии в излучение на установке ИТЭР // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2014. Т. 37. № 4. С. 39.
2. Гаврилов В.В., Еськов А.Г., Житлухин А.М. и др. Мощное линейчатое рентгеновское излучение плазмы, образующееся при столкновении высокоэнергетических плазменных потоков // Физика плазмы. 2018. Т. 44. № 9. С. 730.
3. Гришин Ю.М., Скрябин А.С. Об оценке параметров плазменных потоков в технологических импульсных ускорителях для модификации поверхностей конструкционных материалов // Прикл. физика. 2016. № 3. С. 22.
4. Гаврилов В.В., Еськов А.Г., Житлухин А.М. и др. Встречное столкновение высокоэнергетических плазменных потоков в продольном магнитном поле // Физика плазмы. 2020. Т. 46. № 7. С. 606.
5. Тажен А.Б., Райымханов Ж.П., Досболаев М.К. и др. Получение и диагностика плазменных потоков // Успехи прикл. физики. 2019. Т. 7. № 5. С. 463.
6. Воронин А.В., Гусев В.К., Кобяков С.В. Исследование динамики токовой перемишки в коаксиальном ускорителе плазмы // ЖТФ. 2010. Т. 81. № 7. С. 63.
7. Reisman D.B., Javedani J.B., Ellsworth G.F. et al. The Advanced Helical Generator // Rev. Sci. Instrum. 2010. V. 81. № 3. P. 034701.
8. Demidov V.A., Kazakov S.A. Helical Magneto-cumulative Generator for Plasma Focus Powering // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. V. 38. № 8. P. 1758.
9. Селемир В.Д., Демидов В.А., Ермолович В.Ф. и др. Исследование генерации мягкого рентгеновского излучения в Z-пинчах с запиткой от спиральных взрывомагнитных генераторов // Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 5. С. 424.
10. Drozdov Y.M., Duday P.V., Zimenkov A.A. et al. Development of a Plasma Focus Neutron Source Powered by an Explosive Magnetic Generator // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2015. V. 56. № 1. P. 77.
11. Кравченко А.С., Вилков Ю.В. Источник энергии для моделирования токов молнии // ПТЭ. 2006. Т. 4. С. 79.
12. Фортон В.Е., Черковец В.Е., Шурупов А.В. и др. Взрывомагнитный генератор как источник электропитания импульсного плазменного ускорителя // ТВТ. 2010. Т. 48. № 1. С. 3.
13. Shurupov A.V., Kozlov A.V., Shurupov M.A. et al. Pulse-Current Sources for Plasma Accelerators // Energies. 2018. V. 11. P. 12.
14. Shurupov M.A., Gusev A.N., Zavalova V.E. et al. Calculation Model of the Plasma Load Matching with the Current Sources Based on Magnetic Generator // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1393. P. 012057.
15. Гусев А.Н., Козлов А.В., Шурупов А.В., Маистаков А.В., Шурупов М.А. Твердотельный разрядник для сильного источника энергии на основе емкостного накопителя с рабочим напряжением 50 кВ // ПТЭ. 2020. Т. 1. <https://doi.org/10.31857/S0032816220010140>
16. Умрихин Н.М. Оптимизация мощных импульсных ускорителей плазмы. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1984. 196 с.