

РЕТРОСПЕКТИВА, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК С МОЩНЫМИ НАКОПИТЕЛЯМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И МАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ

Баранов М.И., д.т.н.

НИПКИ "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ"
тел. (057) 707-68-41, факс (057) 707-61-33, e-mail: nipkimolnija@kpi.kharkov.ua

Приведені короткі дані з історії винаходу людством джерел та накопичувачів електрики, вказані деякі результати ретроспективних, сучасних та перспективних вітчизняних і закордонних досліджень по створенню та використанню у наукових і технологічних цілях високовольтних електрофізичних установок з потужними накопичувачами електричної та магнітної енергії.

Приведены краткие данные из истории изобретения человечеством источников и накопителей электричества, указаны некоторые результаты ретроспективных, современных и перспективных отечественных и зарубежных исследований по созданию и использованию в научных и технологических целях высоковольтных электрофизических установок с мощными накопителями электрической и магнитной энергии.

ВВЕДЕНИЕ

Неуклонное развитие науки и техники в мире, постоянный поиск человечеством новых (альтернативных) источников энергии стимулирует развитие различных как вновь появляющихся, так и относительно давно существующих научно-технических областей и направлений, включающих общую (традиционную) и возобновляемую электроэнергетику, силовую электротехнику, материаловедение сверхпрочных композиционных, сверхстойких металлических и изоляционных материалов, техническую электродинамику, силовоточную электронику, технику и электрофизику высоких напряжений и больших токов, высоковольтную высокочастотную (импульсную) технику, силовоточную электроразрядную светотехнику, технику высоких плотностей энергии, включая магнитогидродинамические, ядерные и термоядерные энергоустановки, а также СВЧ-электронику больших мощностей и технику сильных (сверхсильных) электрических и магнитных полей [1-5]. Для практической реализации многих научных фундаментальных и прикладных физико-технических исследований, опытно-конструкторских и технологических работ в указанных научно-технических областях требуются мощные накопители энергии (МНЭ), к которым зачастую предъявляются весьма жесткие технические требования: во-первых, по амплитудно-временным параметрам (АВП) генерируемых ими электрических напряжений и токов, охватывающим мега- и киловольтные диапазоны изменения амплитуд напряжения, мега- и килоамперные по амплитуде токовые диапазоны, а также нано- и микросекундные временные диапазоны; во-вторых, по их ресурсу (числу рабочих включений или срабатываний силовоточных коммутирующих устройств МНЭ); в-третьих, по электрическим параметрам их комплексной нагрузки, принимающим единицы (десятки и сотни) наногенри по индуктивности и от единиц до долей единиц Ома по активному сопротивлению; в-четвертых, по скорости ввода электромагнитной энергии (пиковой мощности ввода энергии) в их электрическую нагрузку; в-пятых, по стойкости их токонесущих частей, электрической нагрузки к высоким (сверхвысоким) плотностям тока и электродинамическим усилиям, температурам и многим другим электро- и теплофизическим характеристикам. Все это вместе приводит к необходимости разработки, создания и практического использования в научных и технологических целях достаточно широкого круга высоковольтных электрофизических

установок (ВЭФУ) с МНЭ, в которых средняя стоимость одного запасаемого килоджоуля энергии, в случае применения в МНЭ конденсаторной батареи и в зависимости от АВП передаваемых в нагрузку импульсных токов (напряжений), может составлять от нескольких сотен до одной тысячи долларов США [6]. Причем, данная удельная стоимость запасаемой электроэнергии будет возрастать с уменьшением длительности (времени нарастания) формируемых в нагрузке с помощью ВЭФУ с МНЭ импульсов напряжения (тока и напряженностей электрического и магнитного полей). Следует отметить, что в настоящее время в ведущих научных физических лабораториях мира успешно эксплуатируются ВЭФУ с предельными параметрами, запасаемая энергия в МНЭ конденсаторного типа которых достигает до 10 МДж [6]. Не безынтересно для читателя указать и то, что в подобных ВЭФУ с МНЭ общей стоимостью не менее одного миллиарда долларов США амплитуда генерируемых в малоиндуктивной и низкоомной нагрузке (реактивное сопротивление по индуктивности порядка 1 нГн) импульсных токов микросекундной длительности достигает колоссальных значений, составляющих до 150 МА [6].

Учитывая предельные значения АВП формируемых с помощью ВЭФУ с МНЭ импульсов напряжения (тока), а также высокий (сверхвысокий) уровень вызванных ими внешних электрических и магнитных полей, рассматриваемая нами проблема, связанная с разработкой, созданием и техническим применением ВЭФУ с МНЭ, вызывает необходимость одновременного оперативного решения целого ряда научно-технических вопросов из другой смежной области, затрагивающей проблемы электромагнитной безопасности и электромагнитной совместимости различных технических средств, оказавшихся в неблагоприятной электромагнитной обстановке вблизи активной зоны генерации мощных электромагнитных помех (МЭМП) от токонесущих частей ВЭФУ с МНЭ [7]. В этой связи последствия практического применения предмета нашего исследования (электроустановок с МНЭ) требуют комплексного подхода к решению возникающих при создании ВЭФУ с МНЭ электромагнитных проблем для современного постиндустриального общества с развитой низковольтной радиотехнической, электронной и электротехнической инфраструктурой, отличающейся сравнительно низкой стойкостью к воздействию МЭМП естественного и искусственного происхождения.

Целью статьи является рассмотрение краткой ис-

тории развития в период 18–21 веков в Европе, Америке, в бывшем СССР, современной Украине и нынешнем ближнем и дальнем зарубежье исследований в области создания ВЭФУ с МНЭ и сжатое изложение некоторых перспективных и имеющих важное практическое приложение, по мнению ее автора, научно-технических вопросов из крайне обширной проблематики, посвященной созданию и использованию в науке и технике ВЭФУ с МНЭ различного типа и назначения.

1. ПЕРВЫЕ РАЗРАБОТКИ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК С МНЭ

Истоки искусственного электричества. Исторически той областью электричества, где человечество добилось первых научно-технических успехов, оказалась электростатика. Известно, что первый искусственно созданный накопитель электричества (электрический конденсатор) был изобретен в Европе в 1746 году голландским физиком Мушенбреком из г. Лейдена. Этот первый накопитель (аккумулятор) электрических зарядов ("лейденская банка") представлял собой воздушный цилиндрический конденсатор, состоящий из наружного электрода (полого тонкого металлического цилиндра), расположенного внутри тонкостенного стеклянного цилиндра, и внутреннего электрода, выполненного из металлического стержня и изолированного от наружного электрода [8]. Практически в это же время в Северной Америке выдающимся американским физиком и общественным деятелем Вениамином (Бенджамином) Франклином был изобретен и сконструирован первый плоский электрический конденсатор, состоящий из двух параллельных металлических пластин, разделенных тонкой стеклянной прослойкой [8]. За созданием первых накопителей электричества в рассматриваемой нами области физических знаний в 1775 году последовало изобретение первой электростатической машины, вырабатывающей электрические заряды за счет электризации трением ее частей, приводимых в движение внешней механической силой [8]. Чуть позже в научном физическом мире появились чувствительные электроскопы, предназначенные для обнаружения электрических зарядов обеих полярностей [8]: в 1782 году снабженный малогабаритным конденсатором электроскоп Вольты с соломинками, а в 1787 году – электроскоп Беннета с золотыми листочками.

Благодаря исследованиям электрохимических явлений известного итальянского ученого-физиолога Луиджи Гальвани, результаты которых были опубликованы последним в 1791 году в его основном научном труде *"Трактат о силах электричества при мышечном движении"*, к жизни была вызвана совершенно новая физическая область – учение об электрическом ("гальваническом") токе. Интересно отметить, что в своих ставших классическими опытах с лапками лягушек Л. Гальвани одним из первых в мире (задолго до великого английского физика Майкла Фарадея и открытия им явления электромагнитной индукции (ЭМИ) в 1831 году) наблюдал явление ЭМИ, связанное с наведением электрического напряжения (тока) в цепи металлической проволоки, помещенной в переменное магнитное поле земного атмосферного происхождения. Здесь требуется дать одно уточняющее пояснение относительно указанных опытов Л. Гальвани: подвешенные над землей к железному проводу лапки лягушки, к концам которых была подсоединена длинная металлическая проволока, опущенная в воду колодца и таким образом хорошо соединенная с землей, начинали судорожно подергиваться во время та-

кого близкого природного электрофизического явления как молния, сопровождающегося длинными сильноточными искровыми грозовыми электрическими разрядами в землю и соответственно появлением мощного переменного магнитного поля в зоне проведения Л. Гальвани этих опытов [9]. Однако по объективным причинам (из-за недостатка общефизических знаний и недостаточно высокого уровня развития физической науки на тот период) Л. Гальвани «прошел» мимо этого фундаментального для теории и практики использования электричества явления, лежащего в основе современной классической электротехники и электродинамики.

Согласно современной истории развития физики первой в мире крупной электроустановкой с накопительной батареей следует считать установку – батарею, построенную в Санкт-Петербургской Медико-Хирургической Академии в 1802 году выдающимся русским академиком-электротехником (электрофизиком) Василием Владимировичем Петровым [8]. Описание устройства этой самой мощной по тому времени батареи и результаты исследований на ней гальвани-вольтовских явлений В.В. Петров дал в 1803 году в своем знаменитом научном труде, носящем следующее название [8]: *"Известие о гальвани-вольтовских опытах, которые производил профессор физики Василий Петров посредством огромной наипаче батареи, состоящей иногда из 4200 медных и цинковых кружков, и находящейся при Санкт-Петербургской Медико-Хирургической Академии"* (рис. 1). В главах I-II (отметим, что главы своей книги В.В. Петров называл "статьями") данного научного труда (монографии) достаточно подробно приведено описание устройства самой "батареи" и даны, пользуясь современной терминологией, практические рекомендации (указания) по ее изготовлению и эксплуатации (по тексту В.В. Петрова "по уходу за ней").

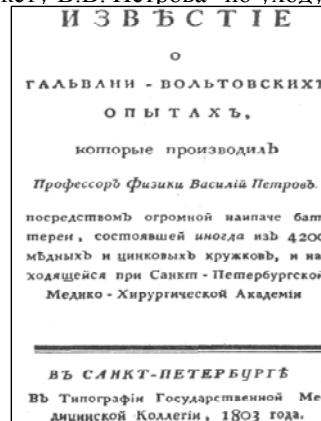


Рис. 1. Титульный лист научного труда *"Известие о гальвани-вольтовских опытах..."* профессора В.В. Петрова

В этой электрической батарее, содержащей 2100 гальванических элемента, между медными и цинковыми кружками наружным диаметром около 38мм были установлены картонные круглые прокладки, пропитанные раствором нашатыря. Каждый гальванический элемент состоял из трех кружков: медного, картонного и цинкового. При этом до десяти гальванических элементов складывались и стягивались в секцию. Эти кружки в отличие от первого в мире генератора электрического тока – гальванического столба (батареи) знаменитого итальянского физика Алессандро Вольты, изобретенного и построенного последним в 1800 году и имевшем вертикальное расположение активных элементов с суконными про-

кладками (в качестве металлических кружков в них могли быть использованы металлы из знаменитого "ряда А. Вольты": цинк, олово, свинец, железо, латунь, бронза, медь, платина, золото, серебро, ртуть), В.В. Петровым были расположены горизонтально. Причем так, чтобы кружки каждого гальванического элемента стояли ребром вертикально в сухих узких деревянных ящиках. Заметим, что сам А. Вольта свой генератор электрического тока, состоящий всего из 20 пар медных и цинковых кружков, разделенных смоченными в соленой воде сукоными кружками-прокладками, называл "электрическим органом" [8]. При этом концам этого "электрического органа" он присвоил название "полюсов", на одном из которых обнаруживалось положительное, а на другом – отрицательное электричество. Именно "вольтов столб" стал определенной вехой в истории развития человеческой цивилизации, возвестившей о наступлении новой эпохи – эпохи электричества. В XIX веке известный французский физик Араго в свое время написал [8]: "...*Вольтов столб*" был самым замечательным прибором, когда-либо изобретенным людьми, не исключая телескопа и паровой машины". Благодаря этому изобретению А. Вольты известный английский физик и химик Гемфри Дэви в 1807 году в процессе своих электрохимических исследований сумел впервые разложить едкие щелочи и получить металлический калий и натрий [8].

Далее отметим то, что В.В. Петров, как автор первой мощной электрической "баттереи", в качестве изоляции между ее гальваническими элементами и деревянным корпусом, а также между проволочными металлическими проводниками впервые применил сургуч. Кроме того, он не забыл и об изоляции тел (объектов испытаний) от пола (земли): эти тела были размещены на деревянной скамеечке со стеклянными ножками. После сборки эта достаточно огромная и по современным меркам электрическая "баттерея" В.В. Петрова состояла из четырех рядов, каждый из которых имел длину 3 м. Данные ряды на концах между собой были соединены последовательно при помощи медных скоб. В итоге общая длина электрической "баттереи" В.В. Петрова составляла 12 м.

В главе VII указанного выше научного трактата В.В. Петров описал свой знаменитый опыт с электрической дугой, проведенный с помощью им же созданной мощной электрической "баттереи". Вот как сам первооткрыватель этого электрофизического явления написал о нем [8]: "*Если на стеклянную плитку или на скамеечку со стеклянными ножками будут положены два или три древесных угля, способные для произведения светящихся явлений посредством гальванической жидкости, и если потом металлическими изолированными направляющими, сообщенными с обоими полюсами огромной баттереи, приблизят оные один к другому на расстояние от одной до трех линий, то является между ними весьма яркий белого цвета свет или пламя, от которого оные угли скорее или медлительнее загораются и от которого темный покой довольно ясно освещен быть может*". Так в мае 1802 года с использованием электроустановки с МНЭ была впервые в мире открыта и исследована электрическая дуга, имевшая в будущем колоссальное прикладное значение в технике и промышленном производстве [10]. Кстати, еще сам В.В. Петров указывал на возможность использования электрической дуги для освещения помещений, плавки и сварки различных металлов [11]. Следует заметить, что это явление в физике впоследствии было названо "вольтовой ду-

гой". В 1808 году "вольту дугу" независимо от В.В. Петрова переоткрыл упомянутый нами выше известный английский ученый Г. Дэви, которому долгое время ошибочно приписывалась слава и первенство открытия этого важного для человечества электрофизического явления. Тем не менее, всемирная история развития науки и техники в вопросе приоритета открытия электрической дуги ("вольтовой дуги"), в конце концов, подтвердила слова В.В. Петрова, написавшего в свое время следующее [11]: "...*Я надеюсь, что просвещенные и беспристрастные физики по крайней мере некогда согласятся отдать трудам моим ту справедливость, которую важность сих последних опытов заслуживает*".

В дальнейшем в области электростатики последовало создание в 1865 году немецким изобретателем Хольцем дисковой электрофорной машины, являющейся разновидностью электростатических генераторов и составляющей и поныне принадлежность современных школьных физических кабинетов [8]. Как известно, в этом типе электростатического генератора механическая энергия, затраченная на круговое вращение и трение его движущихся изоляционных частей дисковой конфигурации, непосредственно превращается в электрическую энергию, носителем которой являются элементарные электрические заряды – электроны.

Отметим, что к электроустановкам с МНЭ на "заре" их создания следует отнести и генераторы переменного напряжения высокой частоты, построенные на основе резонансного трансформатора Теслы, изобретенного в США великим хорватским (сербским) электротехником и электрофизиком Николой Тесла в 1891 году [8, 12]. Данный трансформатор являлся высоковольтным высокочастотным трансформатором, использующим явление резонанса в индуктивно-связанных электрических цепях. Этот вид высоковольтных электрических аппаратов, генерирующих затухающие колебательные импульсы напряжением частотой более 100 кГц и амплитудой от десятков киловольт до 10 МВ и выше, нашел весьма широкое применение в высоковольтной импульсной технике, радиотехнике и атомной технике при проведении разнообразных физических исследований, генерировании высокочастотного электромагнитного излучения и ускорении заряженных элементарных частиц, предназначенных для проведения в вакуумных камерах и камерах Вильсона ядерных исследований [12].

Первоначальные основные научно-технические направления использования в XX веке электроустановок с МНЭ. Здесь исторически, прежде всего, следует начать с создания в начале XX столетия в дореволюционной России известным русским физиком В.К. Аркадьевым и его сотрудниками в Московском университете имени Шанявского, где он проработал ряд лет после ухода из Московского университета имени Ломоносова, так называемого "генератора искусственной молнии" [8]. Данный генератор содержал МНЭ на базе высоковольтных конденсаторов и представлял собой в соответствии с современной терминологией многокаскадный генератор импульсных напряжений (ГИН) этажерочного типа. В историю высоковольтной импульсной техники этот генератор вошел как ГИН, созданный по классической электрической схеме Аркадьева-Маркса [13]. Одним из направлений практического применения этого генератора с выходным рабочим импульсным напряжением в сотни киловольт стали исследования поведения твердого вещества в мощном переменном (импульсном) электромагнитном поле, получаемом в воздухе от

сильноточного искрового электрического разряда указанного "генератора искусственной молнии". Определенная часть этих экспериментальных исследований нашла свое отражение в монографии профессора В.К. Аркадьева "Электромагнитные процессы в металлах", первая часть которой вышла в "свет" в 1934 году, а вторая – в 1936 году [14].

В 1930 году известный американский физик Ван де Грааф предложил оригинальную конструкцию электростатического генератора – ленточный генератор с МНЭ, способный получать высокие постоянные напряжения уровнем 10 МВ и более при токах до 1 мА [13, 15]. В этом ленточном генераторе накопление электрических зарядов в МНЭ, изолированном от земли, происходит за счет предварительного осаждения положительных (отрицательных) зарядов с помощью коронного разряда на движущейся гибкой изоляционной ленте и последующего их транспортирования на ленте и съема с помощью специальных приспособлений в МНЭ. Как правило, этот тип электростатического генератора выполняется закрытого исполнения и работает при заполнении его конструкции элегазом, азотом или смеси азота и углекислого газа под избыточным давлением до 3,0 МПа. Ленточный генератор Ван де Граафа нашел достаточно широкое применение в атомной физике для получения ионных и электронных пучков высокой энергии [15]. Данный тип генератора в тридцатых годах прошлого века был успешно использован выдающимися советскими учеными-физиками И.В. Курчатовым, К.Д. Синельниковым и А.К. Вальтером при создании в Украинском физико-техническом институте (УФТИ), организованном по решению советского правительства в 1928 году (ныне Национальный научный центр "ХФТИ"), новых высоковольтных установок с МНЭ, ускоряющих заряженные частицы, для исследования атомного ядра [8, 16]. В тот период вопросам создания в СССР научно-технической базы ядерной физики уделялось огромное внимание. Построенный в г. Харькове на территории УФТИ ускоритель на базе генератора Ван де Граафа на номинальное постоянное напряжение 5 МВ (диаметр шаров ускорителя составлял 10 м, длина ускорительной трубки была равна 15 м, а давление газа в этой ускорительной трубке составляло $4 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст.) впервые в бывшем СССР обеспечивал получение высокоэнергетических протонов с энергией до 2,5 МэВ. На этом электростатическом ускорителе протонов были успешно осуществлены первые ядерные реакции по расщеплению в СССР атомных ядер вещества, имевшие важное научно-фундаментальное и оборонное значение.

В 1950 году физиком Н.Ю. Фелиси был разработан электростатический генератор роторного типа, являющийся определенной модификацией дисковой электрофорной машины Хольча и ленточного генератора Ван де Граафа [15]. В генераторе Фелиси движущаяся лента была заменена на вращающийся круглый барабан из изоляционного материала. Рабочий диапазон выходных постоянных напряжений в нем (генераторе Фелиси) составляет от 50 до 750 кВ (при токе до 10 мА), причем его верхняя граница могла быть достижима только при закрытом исполнении генератора с использованием газа под давлением (в большинстве случаев азота).

В начале тридцатых годов XX века МНЭ на основе высоковольтных конденсаторов начали употребляться в силовой электроэнергетике для компенсации реактивных потерь мощности в электрических сетях промышленного назначения [17]. Основным техниче-

ским требованием к таким МНЭ была их высокая надежность, обеспечивающая длительную безремонтную эксплуатацию данных электроустановок с конденсаторными батареями в промышленных энергосистемах. Следует заметить, что согласно мировой истории развития высоковольтного аппаратостроения создание ГИН пошло с определенным опережением по отношению к разработке и созданию генераторов импульсных токов (ГИТ), содержащих в своем составе МНЭ [17]. Построение электрических схем ГИТ ранее основывалось и в значительной мере основывается и сейчас на использовании в их зарядно-разрядных электрических цепях конденсаторных батарей, реализованных на базе последовательно-параллельно включенных малоиндуктивных высоковольтных конденсаторов.

В 1937 году известный советский ученый А.А. Горев предложил использовать мощные высоковольтные конденсаторные батареи при физическом моделировании электромагнитных процессов в выключающих аппаратах для режима разрыва электроцепей энергетических систем промышленной частоты 50 Гц [17]. На основе этой идеи в бывшем СССР были созданы контура Горева, обладающие МНЭ и обеспечивающие получение эквивалентных трехфазных мощностей до 400 МВт (при Ленинградском политехническом институте) и выше 1000 МВт (при Всесоюзном электротехническом институте, г. Москва).

В этот же период (тридцатые годы XX века) в связи с резким увеличением протяженности высоковольтных сетей промышленного назначения и ростом на них грозových аварий, вызванных прямым воздействием на элементы энергетического оборудования атмосферного электричества (молнии), во многих странах мира начали создаваться высоковольтные испытательные электроустановки с МНЭ на базе ГИН на выходное рабочее напряжение до 5 МВ и ГИТ на большие импульсные токи с амплитудой до 500 кА [17]. Данные ГИН и ГИТ с МНЭ на основе конденсаторных батарей были применены для комплексного физического моделирования электромагнитных процессов микро- и миллисекундной длительности, возникающих в электрических аппаратах и газовой изоляции при прямых ударах молнии в электроустройства промышленных энергосистем.

2. СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ С МНЭ И ОБЛАСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Начиная с шестидесятых годов XX столетия, в связи с насущными запросами ведущих научных и технических областей (прежде всего, экспериментальной физики, квантовой электроники, физики плазмы, ракетно-космической техники, импульсной светотехники, ядерной физики, астрофизики и др.), решением по линии военных ведомств важных электрофизических задач для укрепления обороноспособности стран Варшавского договора и НАТО и развитием промышленных высоких технологий (например, обработки металлов давлением сильного магнитного поля, обеззараживания питьевой воды и сточных вод, нанотехнологий и др.) в ведущих государствах мира обозначился существенный рост финансовых средств, выделяемых из госбюджета и направляемых частными фирмами на разработку и создание специальных электроустановок с МНЭ [17, 18]. Электрические схемы построения таких установок с МНЭ, как правило, содержали в своем составе следующие основные элементы (рис. 2): ГИН (ГИТ), формирующее устройство (ФУ), сильноточный коммутатор (СК), систему поле-

образования (СП) или передающую линию (ПЛ) и электрическую нагрузку (ЭН).

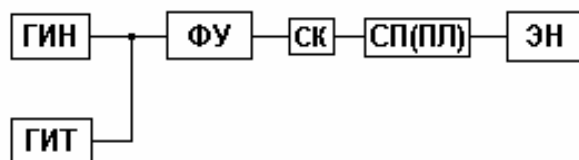


Рис. 2. Блок-схема построения современной высоковольтной электроустановки с МНЭ

Эти электроустановки с МНЭ использовались, в основном, для [18,19]: во-первых, генерирования мощных электронных пучков с последующим их применением в атомной физике, в установках по термоядерному синтезу и при определении стойкости радиоэлектронной аппаратуры к воздействию ионизирующих излучений; во-вторых, накачки мощных квантовых генераторов (лазеров и мазеров), применяемых для получения высокотемпературной плазмы, необходимой при решении проблемы термоядерного синтеза; в-третьих, формирования в воздушных рабочих объемах (от единиц м³ до десятков тысяч м³) мощных электромагнитных полей с заданными АВП и проведения полномасштабных электромагнитных испытаний различных объектов в сборе гражданского и военного назначения с целью определению их электромагнитной стойкости к воздействию МЭМП; в-четвертых, решения технологических задач, связанных с формообразованием сильным импульсным магнитным полем металлических деталей сложной геометрической формы и получением исходных мелкодисперсных материалов для порошковой металлургии; в-пятых, проведения физических исследований поведения различных веществ в сильных импульсных электрических и магнитных полях; в-шестых, исследования электрической прочности газовой, жидкой и твердой изоляции в меговольтном диапазоне воздействующего напряжения нано- и микросекундной длительности; в-седьмых, изучения физики сильноточных искровых разрядов в различных изоляционных средах, испытывающих воздействие сверхвысокого импульсного напряжения в нано- и микросекундном временном диапазоне.

Заметим, что в электроустановках с МНЭ, построенных согласно блок-схеме на рис. 2, в качестве импульсных источников питания могут присутствовать как только ГИН (ГИТ) в отдельности, так и оба эти генератора сразу. Поэтому в электроустановке с МНЭ в зависимости от применяемого генератора (ГИН, ГИТ или ГИН плюс ГИТ), содержащего сильноточные разрядники того или иного исполнения, и заданных на ЭН их разработчиками АВП формируемых импульсов тока (напряжения, напряженностей электрического и магнитного полей) указанная блок-схема может видоизменяться и не содержать в своем составе некоторые элементы (например, ФУ и СК). При параллельной работе ГИН и ГИТ на одну общую ЭН, характеризующихся различными уровнями выходного высокого электрического напряжения и предназначенных для формирования соответственно нарастающей и спадающей частей аperiodических импульсов напряжения (тока, напряженностей электромагнитного поля), специалистам из области высоковольтной импульсной техники требуется решать непростые задачи по взаимной электрической развязке и защите от перенапряжений таких источников импульсного питания электроустановок с МНЭ.

В случае использования в соответствии с рис. 2 в электроустановке с МНЭ высоковольтных ГИН и ФУ последнее устройство (ФУ) предназначается для обстреления импульсов напряжения (тока), получаемых от «медленных» (высокоиндуктивных) ГИН, реализованных в большинстве случаев по схеме Аркадьева-Маркса. В связи с чем оно (ФУ) характеризуется быстрой импульсной зарядкой (за 5 мкс и менее) и высокоскоростной разрядкой (за 500 нс и менее) через СК на СП (ПЛ) и ЭН [18,19]. Это дает возможность работать в МНЭ с повышенными градиентами электрического поля в жидкой изоляции ФУ (до 200 кВ/см) и получать на ЭН требуемые АВП электрических величин напряжения, тока, напряженностей электрического и магнитного полей и плотностей электромагнитной энергии. В качестве ФУ при получении импульсов напряжения амплитудой 1 МВ и более применяются одинарные (двойные) коаксиальные формирующие линии (КФЛ) с жидкой изоляцией (как правило, дисцилированная вода или трансформаторное масло). При генерировании в рассматриваемой схеме больших импульсных токов амплитудой 10⁵ А и выше, когда волновое сопротивление накопительной линии должно быть малым (менее 10 Ом), в качестве ФУ используются полосковые линии передачи (ПЛП) с твердым плоским диэлектриком. В приведенной на рис. 2 блок-схеме ПЛ или СП соответственно предназначены для передачи без искажений сформированных ГИН и ФУ импульсов напряжения (тока) в электрически согласованную ЭН (например, в вакуумный диод или активно-индуктивную нагрузку) и формирования в воздушном рабочем объеме напряженностей электрического и магнитного полей с заданными согласно действующим нормам (стандартам) АВП. Как правило, при этом в качестве ПЛ и СП используются соответственно радиочастотные высоковольтные коаксиальные кабели с полиэтиленовой изоляцией общепромышленного применения и воздушные ПЛП с расщепленными и сплошными верхними и нижними оголенными круглыми цилиндрическими и плоскими токопроводами [18, 19].

В качестве реального примера среднегабаритной электроустановки с МНЭ, построенной в конце XX века с применением ГИН на базе высоковольтных конденсаторов и схемы Аркадьева-Маркса и ФУ на 1 МВ, можно указать установку *Maxibeam* (Maxwell Laboratories, USA) [18]. На данной электроустановке была получена пиковая мощность порядка 10¹² Вт при длительности импульса напряжения на ЭН, равной примерно 50 нс. Примером современной крупногабаритной электроустановки с МНЭ, использующей в своем составе ГИН с конденсаторной батареей и ФУ на 15 МВ, может служить известная установка *Aurora* (Physics International Company, USA), на которой была достигнута предельная на сегодня пиковая мощность порядка 10¹³ Вт и на ее ЭН (вакуумном диоде) получена длительность импульса напряжения, равная 100 нс [18]. Отметим, что указанные выше зарубежные электроустановки с МНЭ были достаточно широко использованы в экспериментальной физике при выполнении сложных научно-исследовательских работ в области управляемых термоядерных реакций, получаемых с помощью мощных электронных пучков, а также для световой накачки мощных лазеров.

Примером созданных в последние десятилетия XX века в бывшем СССР современных среднегабаритных электроустановок с МНЭ на выходное напряжение меговольтного диапазона могут служить установки типа *ИЭМИ-12-1*, *ИЭМИ-12-3* (г. Санкт-

Петербург, ныне Россия), *ИЭМИ-6* (г. Сергиев Посад, ныне Россия) и *ИЭМИ-10* на экспериментальной базе НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" (г. Харьков, ныне Украина), предназначенные для воспроизведения в больших воздушных объемах и грунте МЭМП нано- и микросекундного временного диапазона и их дальнейшего применения для проведения натурных испытаний различных объектов с радиоэлектронной и электротехнической аппаратурой на электромагнитную стойкость [20-22]. Данные электроустановки были выполнены с использованием мощных емкостных накопителей энергии (в дальнейшем *C*-накопителей) в соответствии с блок-схемой, приведенной на рис. 2, и в 2002 году вошли в международный реестр *IEC* 61000-4-32 уникального электрофизического оборудования мира [23]. Так, в электроустановке-имитаторе типа *ИЭМИ-12-1* были сформированы в заданном объеме "воздух-грунт" электромагнитные импульсы с временем нарастания 200 нс при длительности импульса на полуспаде до 6 мс [20]. При этом максимальное значение выходного напряжения на ГИН достигало 1,7 МВ. В электроустановке типа *ИЭМИ-12-3* возбуждение многопроводной СП осуществляет-

ся уникальным малоиндуктивным конденсатором с номинальным напряжением 2,5 МВ [20]. На рис. 3 приведен общий панорамный вид отечественной моделирующей электроустановки с МНЭ типа *ИЭМИ-10* с пиковой мощностью около $2 \cdot 10^{12}$ Вт, содержащей после модернизации в 2005 году в своей электрической схеме следующие основные элементы: ГИН на номинальное напряжение 3,75 МВ с запасаемой энергией 0,95 МДж (ГИН-3), ГИН на номинальное напряжение 4 МВ с запасаемой энергией 1,0 МДж (ГИН-4), ФУ на 2,5 МВ (ФУ-2,5), ГИТ на номинальное напряжение 100 кВ с запасаемой энергией 0,84 МДж (ГИТ-100) и ГИТ на номинальное напряжение 5 кВ с запасаемой энергией 0,975 МДж (ГИТ-5) [24].

В 80-х годах XX столетия весьма широкое развитие в мире получила такая прогрессивная технология обработки металлических деталей как магнитно-импульсная штамповка, использующая электроустановки с МНЭ, выполненные с использованием ГИТ на основе высоковольтных малоиндуктивных конденсаторов [6, 25-28]. Для данной промышленной технологии были разработаны и созданы как в бывшем СССР,



Рис. 3. Общий панорамный вид отечественной среднегабаритной электроустановки с МНЭ типа *ИЭМИ-10*

так и за рубежом (например, в США, Германии, Франции, Польше, Венгрии, Японии и других странах мира) магнитно-импульсные установки (*МИУ*) с запасаемой в мощных *C*-накопителях электроэнергией.

В отечественных и зарубежных *МИУ* запасаемая в МНЭ энергия составляет от 5 до 240 кДж (при зарядном постоянном напряжении до 40 кВ), а генерируемые в их разрядной цепи большие импульсные токи затухающей синусоидальной формы достигают амплитуды до 150 кА (при частоте до 120 кГц). Данные электроустановки с МНЭ способны создавать сильные импульсные магнитные поля в рабочей зоне с обрабатываемой металлической заготовкой напряженностью порядка 200 кЭ. НТУ "ХПИ" и его такие научные и учебные структурные подразделения как научно-исследовательская лаборатория НИЛТВН и ПТ, в дальнейшем трансформированная (переросшая) в НИПКИ "Молния", и кафедра "Инженерная электрофизика" занимали с самого начала работ в СССР по магнитной штамповке и занимают сейчас ведущие позиции в области магнитно-импульсной обработки металлов (*МИОМ*). Наш университет являлся раньше и является теперь по существу единственным в Украине научным центром в области *МИОМ*. В настоящее время с помощью усовершенствованных *МИУ* с МНЭ, разрядные контуры которых способны генерировать большие импульсные токи высокой частоты, могут успешно деформироваться как высокоэлектропроводные (например, медные), так низкоэлектропроводные (например, стальные) металлические заготов-

ки. Кроме того, в начале XXI столетия технология *МИОМ* получила свое дальнейшее развитие в НТУ "ХПИ" благодаря определенному успеху по обработке тонкостенных металлов, толщина которых соизмерима или меньше величины токового скин-слоя в обрабатываемой заготовке (например, медных печатных плат для электротехнических схем) [28].

В последние годы в Украине получила развитие новая импульсная электротехнология на основе комплекса высоковольтных импульсных воздействий (*КВИВ*), впервые разработанная и практически внедренная в опытное производство учеными и специалистами-электрофизиками НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" [29-31]. Для практической реализации *КВИВ*-технологии здесь были разработаны и созданы электроустановки с МНЭ для микробиологической обеззараживающей и инактивирующей обработки различных текучих продуктов, включая пищевые продукты, а также для широкополосной электромагнитной импульсной терапии, получения импульсного коронного разряда с зоной ионизации, занимающей большую часть разрядного промежутка, и генерации с его (коронного разряда) помощью озона. В этих электроустановках с МНЭ и рабочим ресурсом до 10^{11} включений (импульсов) используются специальные генераторы высоких импульсных напряжений, импульсные трансформаторы и конденсаторы, искровые и коронные разрядники, СП, системы обострения фронтов импульсов и увеличения пиковой электрической мощности, позволяющие в рабочих камерах с обраба-

тываемым материалом достигать напряженностей импульсного электрического поля до 100 кВ/см и длительностей их фронтов от 20 нс до 0,1 нс при длительностях высоковольтных импульсов напряжения (электрического поля) – не более нескольких микросекунд [29, 31]. Эти электроустановки обеспечивают подачу на рабочие камеры крутых и коротких импульсов напряжения амплитудой до 120 кВ при частоте их следования до 500 Гц. Производительность подобных электроустановок с МНЭ при обработке текучих продуктов в потоке достигает 1 м³/час [30].

В настоящее время отдельный класс электроустановок с МНЭ составляют высоковольтные установки для комплексного проведения электромагнитной диагностики состояния заземляющих устройств (ЗУ) действующих электроэнергетических объектов [32-34]. С этой целью были разработаны и созданы специальные источники питания и измерительные средства типа *КДЗ-1У* и *ИКП-1*, внесенные в 2000 году в государственный реестр России, а в 2004 и в 2005 годах – в реестр Украины [33]. Определяющий вклад в развитие этого направления научно-технической деятельности по обследованию ЗУ высоковольтных подстанций и линий электропередачи промышленных энергосистем под напряжением был внесен сотрудниками Московского энергетического института (Россия) и НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" (Украина).

3. ГЕНЕРАТОРЫ ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ С МНЭ

На рис. 4 приведен общий вид уникального ГИН на номинальное напряжение 14 МВ (ГИН-14), предназначенного для формирования на ЭН импульсов напряжения мегавольтного уровня с длительностью фронта от 1 до 250 мкс и длительностью импульса на половине амплитуды от 10 мкс до 20 мс [35].



Рис. 4. Общий вид ГИН наружной установки на номинальное напряжение 14 МВ с запасаемой энергией в 2,24 МДж

Зарядно-разрядный контур (ЗРК) данного стационарного ГИН этажерочного типа был реализован по схеме Аркадьева-Маркса, а сам генератор построен в конце 20-го столетия на экспериментальной базе (полигоне) НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ". ГИН-14 состоит из 56 каскадов (по 8 каскадов на каждый из семи этажей, имеющих высоту 6,1 м и наружный диаметр 13 м), каждый из которых содержит один многоззорный искровой коммутатор типа МЗК-250 и восемь высоковольтных малоиндуктивных конденсаторов типа КИМ-35 в металлическом корпусе емкостью 0,64 мкФ на номинальное напряжение 125 кВ (собственная индуктивность-370 нГн) разработки нашего института [35]. В ГИН-14 в качестве основного элемента изоляционной несущей конструкции (ИНК) был использован опорный фарфоровый изолятор типа КО-110-2000 со специальными литыми металлическими фланцами, опорные поверхности которых после армирования на рубашке изолятора были обработаны с точностью до 50 мкм. Основным монтажным элементом ИНК данного генератора являлась стойка высотой 3 м, состоящая из 10 изоляторов указанного типа и трех металлических тумб (одной средней и двух крайних). Общее количество использованных в ИНК ГИН-14 опорных изоляторов типа КО-110-2000 составило 1680 шт., каждый из которых характеризовался разрушающей механической нагрузкой при осевом сжатии в 200 т. Снаружи ГИН-14 для защиты от прямых атмосферных осадков был обшит рулонным стеклопластиком типа РЭМ толщиной 0,8 мм и частично (до 25%) листовым витринным стеклом толщиной 10 мм.

На рис. 5 представлен общий вид стационарного ГИН этажерочного типа на номинальное напряжение 4 МВ (ГИН-4) и запасаемую энергию в 1 МДж [36].



Рис. 5. Общий вид ГИН наружной установки на номинальное напряжение 4 МВ с запасаемой энергией в 1 МДж

ЗРК ГИН-4 (рис. 6) содержит 16 каскадов, в состав каждого из которых (за исключением первого от земли каскада) входит один неуправляемый воздушный двухэлектродный шаровой разрядник $\varnothing 125$ мм и

восемь высоковольтных конденсаторов в металлическом корпусе типа КБМГ-125/1 (напряжение 125 кВ, емкость 1 мкФ) разработки НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ". Индуктивность разрядной цепи ГИН-4 составляет около 80 мкГн, а емкость в разряде такого генератора – 0,125 мкФ [24, 36]. Активное сопротивление цепи разряда ГИН-4, определяемое успокоительными (демпфирующими) резисторами, равно 4,5 Ом. В зависимости от АВП формируемых импульсов напряжения (тока) эти резисторы могут быть сравнительно легко выведены из ЗРК генератора.

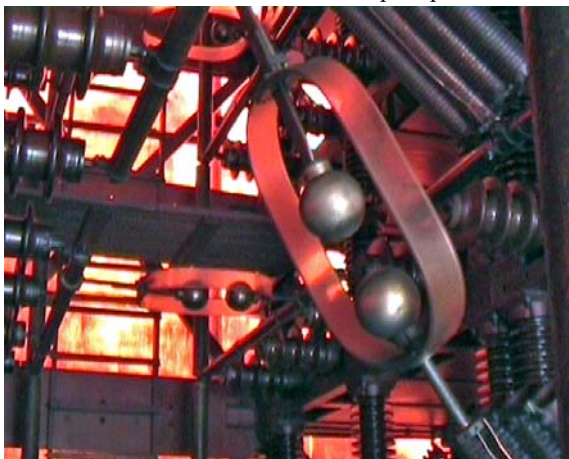


Рис. 6. Элементы ЗРК в ГИН на номинальное напряжение 4 МВ с запасаемой энергией в 1 МДж

Конденсаторы типа КБМГ-125/1 в рассматриваемом генераторе импульсов сверхвысокого напряжения общим количеством в 128 шт. расположены на 16 металлических горизонтальных полках, соединенных поэтажно через высоковольтные разрядные резисторы номиналом в 110 кОм с землей. Первый каскад ГИН-4 содержит управляемый трехэлектродный разрядник (тригatron), запускаемый от генератора пусковых импульсов (ГПИ) напряжения на 10 кВ. Срабатывание тригatronа первого каскада в ГИН-4 за счет возникающих перенапряжений на остальных выше размещенных каскадах обеспечивает покаскадное срабатывание его оставшихся 15 воздушных шаровых разрядников на 125 кВ. С помощью данного генератора опытным путем были получены импульсы напряжения со скоростью нарастания до $4 \cdot 10^{12}$ В/с и импульсы тока со скоростью нарастания до $5 \cdot 10^{10}$ А/с [36].

На рис.7 показан общий вид созданного в 2006 году сотрудниками НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" передвижного ГИН этажерочного типа на номинальное напряжение 1,2 МВ (ГИН-1,2), который работает на "воздухе" и имеет следующие технические характеристики: выходное рабочее напряжение 1 МВ, емкость в "ударе" 20,8 нФ, запасаемая энергия 15 кДж, собственная индуктивность 6 мкГн (удельная индуктивность – до 5 мкГн/МВ), активное сопротивление низкоиндуктивных демпфирующих резисторов 48 Ом. Данный ГИН, построенный по классической схеме Аркадьева-Маркса, предназначен для генерирования на испытываемом техническом объекте (например, на высоковольтном опорном изоляторе) стандартных (согласно требованиям межгосударственного ГОСТ 1516.2-97) и нестандартных грозовых и коммутационных волн напряжения амплитудой от 190 до 1000 кВ [37, 38]. Коммутируемые в ГИН-1,2 импульсные разрядные токи достигают предельных значений (до 50 кА) для используемых в нем промышленных высоковольтных импульсных конденсаторов типа ИК-100-0,25У4,

имеющих изоляционный корпус и характеризующихся ресурсом до $5 \cdot 10^4$ циклов "заряд-разряд". Отличительной особенностью этого ГИН является то, что он сравнительно легко и быстро обслуживается, демонтируется и транспортируется к объекту испытаний (при высоте ИНК в 3,3 м вес генератора не превышает 650 кг). Кроме того, примененные в ЗРК данного ГИН многоззорные искровые коммутаторы на 100 кВ (МЗК-100) обладают широкой зоной коммутации ΔU (до 0,75), что обеспечивает для одной настройки в них размеров воздушных искровых промежутков их надежное срабатывание при весьма большом диапазоне изменения постоянного зарядного напряжения каждого из 12 каскадов генератора [38].



Рис. 7. Общий вид передвижного ГИН на номинальное напряжение 1,2 МВ с запасаемой энергией в 15 кДж

В [39] описана конструкция ГИН на номинальное напряжение 4,5 МВ (ГИН-4,5М) с горизонтальным расположением каскадов для быстрой зарядки (за время не более 0,5 мкс) маслонаполненной КФЛ на 5 МВ. Генератор ГИН-4,5М с запасаемой энергией в 162 кДж содержит 25 размещенных в минеральном масле каскадов на 180 кВ, каждый из которых имеет один газонаполненный разрядник под избыточным давлением до 1,2 МПа и четыре высоковольтных импульсных конденсатора типа ИК-100-0,4У4 в изоляционном корпусе. Общее количество этих конденсаторов в данном генераторе равно 100 шт. Емкость в "разряде" ГИН-4,5М составляет 16 нФ, собственная индуктивность не превышает 25 мкГн, а суммарное активное сопротивление демпфирующих (успокоительных) резисторов принимает значение около 120 Ом [39]. ГИН-4,5М был использован в составе импульсного источника питания сверхвысокого напряжения для крупногабаритной испытательной электроустановки типа *ГИНТ-12-30* [22].

Важной электротехнической задачей при создании высоковольтных электроустановок с МНЭ является получение малых значений удельной индуктивности их разрядных цепей. В [40] приведены схемные и технические решения, направленные на решение данной задачи применительно к разработке перспективных конструкций ГИН мегавольтного диапазона наружной установки. Описанные в [40] решения позволяют в работающих на "воздухе" ГИН на номинальное напряжение от 1,2 до 4,0 МВ достигнуть численных значений их удельной собственной индуктивности, составляющих от 2,5 до 3,5 мкГн/МВ. Меньшие удельные значения собственной индуктивности ГИН могут быть получены только при размещении их ЗРК в жидком диэлектрике или газе под избыточным давлением [18, 39].

4. ГЕНЕРАТОРЫ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ С МНЭ

В [6, 17-19] кратко в исторической последовательности рассмотрены многочисленные конструкции ГИТ, содержащих в своем составе МНЭ, базирующиеся на C – накопителях и индуктивных (магнитных) или L – накопителях энергии. Наибольший интерес для нас представляют конструкции современных ГИТ, входящих в состав таких известных зарубежных мощных электроустановок как "*Фарос*", "*Сицилла*", "*Изар*" и "*Сициллак*". Запасаемая энергия в C – накопителях указанных электроустановок при их зарядном постоянном напряжении от 20 до 70 кВ составляет от 1 до 10 МДж. Получаемые с их помощью импульсные мегаамперные токи микросекундного временного диапазона достигают рекордных на сегодня амплитудных значений от 12 до 150 МА и используются в экспериментальной физике для исследования линейного и тороидального тетапинча [6, 17].

Из отечественных мощных ГИТ, построенных на C – накопителях энергии, нами могут быть указаны конструкции генераторов типа ГИТ-5 и ГИТ-100, сооруженных в конце XX века на экспериментальной базе НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" [24]. Эти ГИТ являются и на настоящее время самыми мощными в Украине и имеют соответственно значения запасаемой энергии, равные 0,975 и 0,84 МДж. ГИТ-5 содержит 557 шт. параллельно соединенных высоковольтных конденсаторов типа ИМ2-5-140 на номинальное напряжение 5 кВ и емкость 140 мкФ. На данном ГИТ при его общей емкости в "разряде" 77,98 мФ был получен аperiodический ток миллисекундного диапазона амплитудой до 30 кА, используемый при электро-

магнитных испытаниях технических объектов общепромышленного и оборонного назначения. На рис. 8 представлен общий вид C – накопителя мощного ГИТ-100, содержащего в своем составе 224 шт. параллельно-последовательно соединенных высоковольтных конденсаторов типа ИК-50-3 на номинальное напряжение 50 кВ и емкость 3 мкФ. Общая емкость в "разряде" двух последовательно включенных групп его конденсаторов (по 112 шт. параллельно включенных емкостных накопителя в каждой группе) составляет 168 мкФ. Достигнутая с помощью ГИТ-100 амплитуда разрядного аperiodического тока миллисекундной длительности в цепи с высокоиндуктивной RL – нагрузкой составила до 35 кА. Этот ГИТ практически используется при испытаниях различных объектов гражданского и военного назначения на электромагнитную стойкость к воздействию МЭМП.



Рис. 8. Общий вид высоковольтных элементов мощного C –накопителя отечественного ГИТ-100 с запасаемой энергией в 840 кДж

Определенного внимания для специалистов в области техники и электрофизики высоких напряжений (больших токов) заслуживает мощный ГИТ при запасаемой энергии в 190 кДж, недавно разработанный и созданный в НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" [41, 42]. В основу построения этой уникальной для Украины высоковольтной электроустановки с секционированным МНЭ была положена известная схема Фитча-Говела [1]. Данный ГИТ содержит 12 конденсаторных секций, каждая из которых состоит из восьми последовательно включенных высоковольтных импульсных малоиндуктивных конденсаторов типа КИМ-120 собственного изготовления [42]. Номинальное напряжение примененного конденсатора типа КИМ-120 составляет 55 кВ, его электрическая емкость – 1,3 мкФ, а собственная индуктивность – 10 нГн. Данный конденсатор был разработан и создан в отделении силового конденсаторостроения упомянутого выше института, рассчитан на работу с ресурсом 10^5 циклов "заряд-разряд" при максимальном значении его разрядного тока в 170 кА. Длина конденсаторной секции в радиальном направлении генератора была равна около 1,2 м, а радиус окружности зоны размещения элементов ГИТ (без учета габаритных размеров выходных силовых разрядников, размещенных по круговому периметру за пределами емкостных секций) – примерно 2,4 м. Опытные значения индуктивности разрядного контура одной конденсаторной секции составили 142 нГн. При разряде конденсаторных секций указанного мощного ГИТ на эквивалент индуктивной нагрузки в 50 нГн был экспериментально получен аperiodический импульс тока амплитудой 2 МА и длительностью до 0,7 мкс [41, 42]. Указанный мощный ГИТ в настоящее время используется при проведении специальных исследований в области экспериментальной физики.

Продолжение следует...