

А.И. Вовченко, докт.техн.наук, **Л.З.Богуславский**, канд.техн.наук, **Л.Н.Мирошниченко**, канд.техн.наук (Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев)

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МОЩНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ В ИИПТ НАН УКРАИНЫ (ОБЗОР)

Оглядова стаття містить результати досліджень зі створення потужних високовольтних генераторів імпульсних струмів в ІИПТ НАН України за останні 40 років. Наведено технічні характеристики та відмінні особливості кращих зразків діючого обладнання та напрями подальшого розвитку генераторобудування для електророзрядних технологій.

Обзорная статья содержит результаты исследований по созданию мощных высоковольтных генераторов импульсных токов в ИИПТ НАН Украины за последние 40 лет. Приведены технические характеристики и отличительные особенности лучших образцов действующего оборудования и направления дальнейшего развития генераторостроения для электроразрядных технологий.

Вопросы энерго-и ресурсосбережения постоянно находятся в центре внимания работ, выполняемых в рамках комплексных научно-технических программ.

Повышение энергетической эффективности промышленного оборудования, снижение энергоемкости продукции, создание новых поколений высокоэффективных устройств и систем полупроводниковой преобразовательной техники всегда были одним из приоритетных направлений научных исследований институтов Академии наук Украины, занимающихся решением физико-технических проблем электроэнергетики [18]. Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины не исключение: сорок лет научно-исследовательских работ в области создания высокоэффективных электроразрядных технологий (рис. 1) требовали для их реализации разработки уникального высоковольтного оборудования, ключевым элементом которого является генератор импульсных токов (ГИТ). За это время появились новые технологические направления и модернизировались имеющиеся; повышались требования к уровню удельных и технологических характеристик; совершенствовалась элементная база, что повлекло за собой необходимость включения в состав высоковольтного оборудования лучших образцов силовой электроники, микропроцессорной техники, магнитных материалов; повышались требования заказчиков к стабильности, контролю и регулированию процессов при минимальном субъективном воздействии (в идеале – создание интеллектуальных систем управления, исключающих вмешательство человека в технологический процесс).

Процесс развития теоретической и экспериментальной базы импульсного генераторостроения является постоянным и непрерывным (рис. 2).

В статье приведены технические характеристики и отличительные особенности лучших образцов оборудования общепромышленного применения, полученных в результате научных исследований по созданию мощных высоковольтных генераторов импульсных токов в ИИПТ НАН Украины за последние 40 лет. В течение этого периода развивались новые технологические направления и менялись требования к их техническим и технологическим характеристикам. Для реализации этих тре-

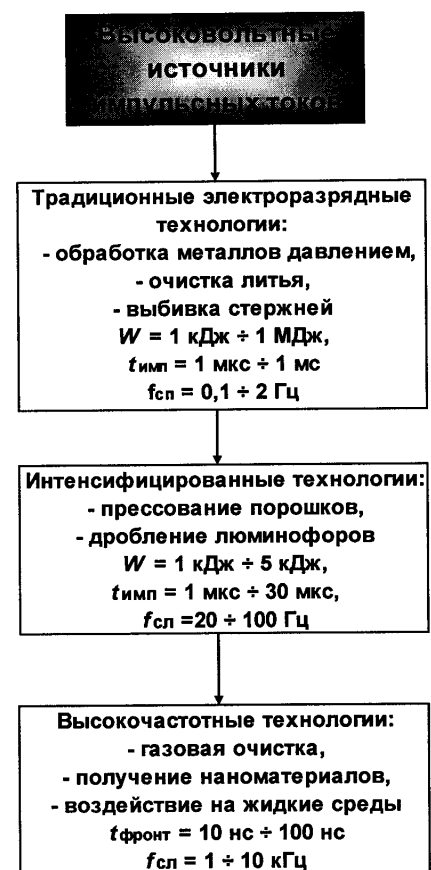


Рис. 1

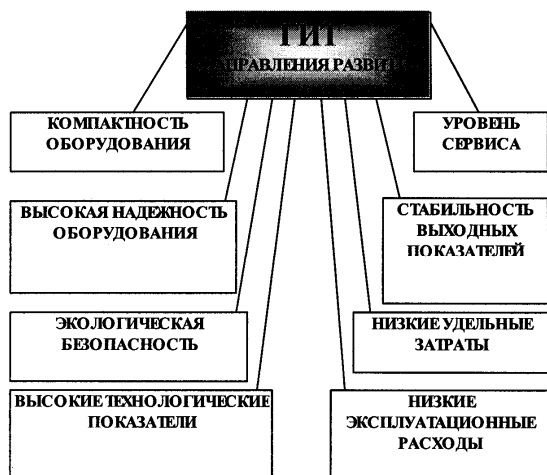


Рис. 2

рудование, обеспечивающее необходимый электроразрядным технологиям уровень полезных мощностей – порядка десятка киловатт, рабочих напряжений до 50 киловольт, энергий в импульсе до сотен килоджоулей, частот следования импульсов до 2 Гц. Это были металлоемкие конструкции с удельными характеристиками порядка 250 кг/кВт. Основным энергетическим узлом ГИТ были ВТМ (высоковольтные трансформаторы-выпрямители масляные), которые были выполнены на селеновых выпрямительных столбах, весящих до сотни килограмм, с потерями мощности порядка 25–30% от потребляемой, а сердечники магнитных элементов были выполнены из электротехнической стали толщиной 0,35 мм. Потери в блоке составляли более 50%, процесс зарядки емкостного накопителя энергии был нерегулируемым, броски тока при включении достигали 5–10-кратных значений, вызывая аварийные провалы напряжения питающей сети. При такой организации зарядного процесса невозможно было стабилизировать частоту следования импульсов и технологический процесс был крайне нестабильным. Тем не менее, успешно развивались технологии, в которых допускалась неравномерная частота следования импульсов: очистка отливок, обеззараживание вод и утилизация отходов, штамповка деталей. Технологии, требующие стабильности частоты следования импульсов, работали с большим количеством брака (штамповка и очистка тонких и точных деталей, развальцовка труб).

Разработки ГИТ включали все уровни проектирования. В них принимали участие специалисты разных профилей: высоковольтники, электронщики, технологи, конструкторы, электромеханики, намотчики, спекальщики и др. Всего в разработке ГИТ было задействовано несколько научных отделов (силовой электроники, автоматики, конденсаторостроения) общей численностью до сотни человек и целый ряд вспомогательных структурных подразделений: технологический отдел, экспериментальное производство, опытный завод и т.д. Разрабатываемые изделия проходили межведомственные испытания, на них выпускалась полная конструкторская документация, технические условия, патентные формуляры. Благодаря этому серийный выпуск генераторов ГИТ31М, осуществляемый ОЗ ИИПТ НАНУ и МПО «Электрозавод» им.В.Куйбышева, трижды удостоивался государственного знака качества. Было выпущено более полутысячи таких генераторов, ряд из которых входили в состав серийных установок по очистке отливок, выпускаемых на заводе «Амурлитмаш» (Комсомольск на Амуре).

Основные технические параметры одного из первых серийных генераторов ГИТ 31М (таблица, п.1) были следующие:

– рабочее напряжение $U_{\text{раб}} - 50$ кВ; частота следования импульсов $f_{\text{сл}} -$ до 2 Гц; энергия в импульсе $W - 2,5 \div 5$ кДж; полезная мощность $P_{\text{пол}} - 10$ кВт; полная мощность $S - 25$ кВА; потребляемый ток $I - 37$ А; КПД – 70 %; коэффициент мощности – 0,4; габаритные размеры 1630x1800x1900 мм; масса – 2500 кг.

бований необходима разработка уникального высоковольтного оборудования, не имеющего аналогов в мировой практике: мощных высоковольтных генераторов импульсных токов для электроразрядных технологий. В ИИПТ созданы генераторы импульсных токов с мощностями до сотен киловатт, рабочим напряжением до сотен киловольт, частотой следования импульсов до десятков килогерц, энергией в импульсе до сотен килоджоулей.

До начала 70-х годов обрабатывались традиционные электрогидроимпульсные технологии, такие, как очистка отливок и штамповка, которые обеспечивались простыми и надежными генераторами импульсных токов амплитудой до сотен килоампер, длительностью десятки и сотни микросекунд с частотами следования импульсов до 2 Гц.

Сорок лет назад уровень развития элементной базы и теоретические наработки института позволили создать мощное высоковольтное обо-

	$P_{\text{пол.}}$ кВт	$P_{\text{уд.}}$ кг/кВт	масса, кг	W , кДж	$f_{\text{сл.}}$, Гц	$t_{\text{имп.}}$, мкс	$t_{\text{фр.}}$ нс	$\cos \varphi$	КПД, %
ГИТ для традиционных технологий									
ГИТ31 М	10	250	2500	2,5–5	0,1–2	1–100		0,4	70
ГИТ38	80	60	4500	5–10	0,1–16	10–100		0,92	93
ГИТ50/40	40	72,5	2900	5–40	1–8	1–100		0,92	93
ГИТ для интенсифицированных технологий									
ВЧ ГИТ	100	52	5200	1–5	20–100	10–30		0,8	90
Малогабаритный ГИТ									
ГИТ М 50-5/4	10	40	400	5–100	2–16	10–100		0,78	85
Генератор импульсов с наносекундным фронтом									
ГИ НФ	10	7	70		до 10000	10–100	10– 100	0,8	75

Широкое внедрение электрогидроимпульсной технологии, ужесточение требований к качеству изделий (стабилизации процессов) привело к необходимости решения новых научных задач: уменьшить удельные массогабаритные показатели, снизить потери энергии, стабилизировать частоту следования импульсов, устранить провалы напряжения в сети, связанные с 5–10-кратными бросками тока в начале зарядного процесса.

Использование новой элементной базы (кремниевые выпрямительные столбы [16] взамен селеновых) позволило уменьшить потери в выпрямителе на 20–30%. Снижение удельных энергозатрат обеспечено благодаря замене зарядных устройств с активным либо индуктивным токоограничением на индуктивно-емкостные. Реализация резонансного процесса зарядки емкостных накопителей позволила увеличить коэффициент мощности на 30–40%. Обеспечение стабилизации частоты следования импульсов стало возможным благодаря использованию индуктивно-емкостного преобразователя (ИЕП) источника напряжения в источник тока [4], с помощью которого осуществляется линейное нарастание напряжения на емкостном накопителе [9]. Новое поколение ГИТ было выполнено моноблочным с параметрическим рядом мощностей от 40 до 80 кВт, что существенно расширило технологические возможности электроразрядных технологий [5].

Разработанный новый ряд генераторов на базе ИЕП и кремниевых выпрямителей-трансформаторов КВТМ 40/50 и КВТМ 80/50 имел лучшие энергетические характеристики (на 20 % – КПД и на 40 % – коэффициент мощности) и в 3–4 раза лучшие массогабаритные показатели (таблица, п. 2,3).

Интенсификация технологических процессов потребовала разработки специального оборудования под новый класс задач. Поэтому следующий этап в генераторостроении был направлен на создание ГИТ, обеспечивающего разряд емкостного накопителя с частотой 100 Гц. Новая разработка получила название высокочастотный (ВЧ) ГИТ [17]. Время заряда накопителя – 10 мс было соизмеримо с временем восстановления электрической прочности высоковольтных разрядников и основного технологического межэлектродного промежутка в рабочей жидкости. Для решения этой проблемы было создано зарядное устройство мощностью 100 кВт, рабочим напряжением 50 кВ с реактором на стороне выпрямленного тока [14]. Его зарядные характеристики обеспечили задержку нарастания рабочего напряжения на начальной стадии зарядного процесса емкостного накопителя до времени восстановления электрической прочности разрядных промежутков с последующим форсированным его ростом. Выделение энергии в рабочей жидкости распределено по пяти каналам с суммарной частотой до 100 Гц. Это обеспечивает восстановление разрядного промежутка в воде на каждом из каналов. Энергия в импульсе ГИТ в зависимости от частоты следования импульсов может варьироваться от 1 до 5 кДж. В ВЧ ГИТ использованы разработанные в институте накопители ИМК-70-0,1-УЗ ТУ 16 52.22.76, работающие при повышенной частоте следования импульсов. ВЧ ГИТ состоит из двух блоков: зарядного (3200 кг, 1450x1342x1835 мм) и высоковольтного (2000 кг, 800x2000x2100 мм). Удельные массогабаритные характеристики ВЧ ГИТ – 52 кг/кВт, КПД – 90% при коэффициенте мощности 0,8 (таблица, п.4).

Развитие силовой электроники, появление на рынке быстродействующих управляемых полупроводниковых приборов с расширенным диапазоном параметров позволило коренным образом

пересмотреть концепцию построения схмотехники зарядных устройств ГИТ [6,10,15]. Разработка мощных полупроводниковых приборов – тиристоров и транзисторов – позволила существенно уменьшить массогабаритные показатели ГИТ за счет использования звена промежуточного преобразования частоты (ППЧ) [2,8,13]. Кроме того, новое поколение полупроводниковых приборов позволило обеспечить регулирование необходимых параметров зарядных и технологических процессов [11].

По результатам исследований [2] был разработан регулируемый малогабаритный ГИТ и выпущена конструкторская документация ГИТ М 50 -5/4 -10 УХЛ 4 (комплект чертежей, технические условия, паспорт, программа и методика испытаний). Изготовлены опытные образцы унифицированных блоков зарядных устройств, включенных в состав ГИТ М 50. Блок-схема ГИТ представляет собой зарядное устройство емкостного накопителя энергии, состоящее из унифицированного блока промежуточного преобразователя частоты, индуктивно-емкостного преобразователя и выпрямителя-трансформатора, а также разрядное устройство (РУ) и систему управления. Основные параметры генератора приведены в таблице (п.5).

Преобразователи промышленной частоты могут быть разнообразными (электромашинными, тиристорными или транзисторными с мощностью на выходе не менее 20 кВт и возможностью регулировки выходной частоты в диапазоне от 1000 до 2000 Гц), однако для данных генераторов специально разработан преобразователь промышленной частоты. Габаритные размеры устройства – 180x445x350 мм, масса – 14 кг, выходная мощность – не менее 20 кВт. В основу работы унифицированного блока ППЧ положен принцип регулирования мощности путем пакетной передачи несущей высокой частоты (2 кГц), модулированной низкочастотными управляющими сигналами (20 Гц) регулируемой длительности. Силовая часть ППЧ представляет собой мостовой инвертор и выпрямитель с сетевым емкостным фильтром. В качестве силовых ключей использованы силовые модули на IGBT-транзисторах с параметрами 1200 В, 100 А. Система управления состоит из нескольких функциональных узлов – генератора и усилителя импульсов несущей частоты, усилителя сигнала токовой защиты (сигнала ошибки), узла индикации, состоящего из дешифратора и формирователя свечения линейки светодиодов, и однокристалльного программируемого микроконтроллера (ОМК), осуществляющего управление работой всей системы управления.

Высоковольтный блок выпрямителя-трансформатора изготовлен на базе современных магнитных и полупроводниковых элементов, имеющих незначительные потери на высокой частоте. Использование этих технических решений позволило почти на порядок уменьшить удельные массогабаритные характеристики зарядного блока по сравнению с ранее разработанными. Основные параметры ВТМ: рабочее напряжение – до 50 кВ, выходная мощность – до 20 кВт, масса – 67,4 кг; габаритные размеры – 450x356x516 мм. Блок ВТМ может меняться в зависимости от требований заказчика к выходным параметрам устройства. По требованию заказчика ГИТ может комплектоваться адаптивной системой управления [12].

Разработка ГИТ с адаптивными системами управления является следующим уровнем развития работ по совершенствованию устройств преобразовательной техники [12]. Для создания базы данных и базы правил, касающихся требований конкретных заказчиков, необходима соответствующая обработка данных технологического процесса.

На настоящем этапе развития генераторостроения в ИИПТ ведется разработка нового поколения высоковольтных генераторов импульсов с наносекундным фронтом нарастания рабочего напряжения и повышенной (до 10 кГц) частотой следования разрядных импульсов. Такие параметры являются необходимым условием для решения новых технологических задач, касающихся создания оборудования для газоочистки в системах одновременной электрофильтрации и озонирования промышленных газов, получения наноматериалов, активации жидких и газообразных сред. Для обеспечения этих технологических процессов необходимо формировать стримерные коронные либо объемные разряды. Такие разряды могут быть возбуждены и поддерживаться стабильными на специальных электродных системах при амплитуде импульса напряжения до 100 кВ, длительности положительной полуволны – 10–100 мкс при фронте менее 100 нс, частоте следования импульсов – (1–10) кГц и потребляемой мощности до 10 кВт.

Особенностью построения таких генераторов является отсутствие поэтапной компрессии импульсов, широко используемых в известных разработках [1]. Оригинальным в новом генераторе является принцип формирования заданной формы импульса в низковольтной части быстроедей-

вующего транзисторного преобразователя с последующей трансформацией его в нагрузку через согласованный высоковольтный высокочастотный импульсный трансформатор [3].

Блок-схема генератора показана на рисунке 3.

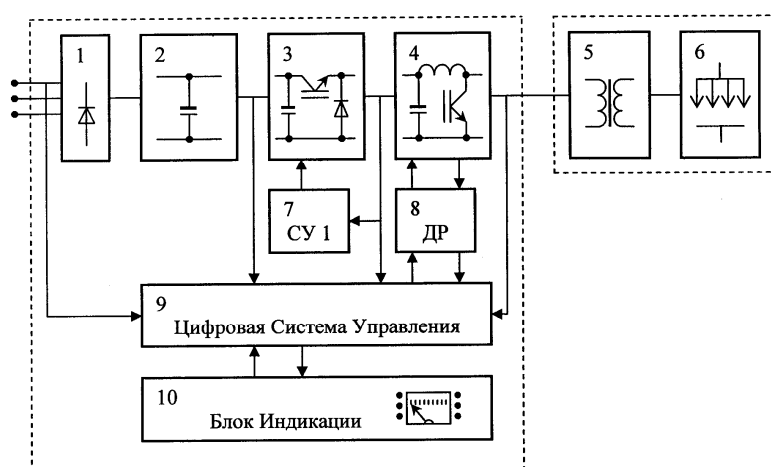


Рис. 3

Схема содержит сетевой выпрямитель 1, емкостной фильтр 2, чопперный регулятор напряжения 3, формирователь импульсов с наносекундным фронтом 4, высоковольтный импульсный трансформатор (ВИТ) 5. Нагрузкой генератора является электродная система. Система управления (СУ) генератора импульсов включает: систему управления чопперным регулятором 7, драйвер силового ключа 8, цифровую систему управления устройством 9, блок индикации 10. Импульс напряжения с наносекундным фронтом на первичной обмотке ВИТ формируется путем

коммутации предварительно заряженной емкости через индуктивное токоограничение на первичную обмотку ВИТ. Во время паузы между импульсами емкость перезаряжается через индуктивное токоограничение и первичную обмотку трансформатора, обеспечивая его размагничивание. При работе генератора импульсов необходима стабилизация выходного напряжения в диапазоне значений, меньших напряжения искрового пробоя межэлектродного промежутка, являющегося для силовой схемы аварийным режимом. Поскольку в данной схеме формирования импульсов невозможно изменение выходного напряжения ВИТ путем изменения алгоритма работы силового ключа ФИ (применение ШИМ, ЧИМ), в схеме применен высокочастотный регулятор напряжения питания ФИ. Контроллер напряжения СУ подключен к датчику тока на выходе ФИ для определения по току искрового пробоя на электродах фильтра с целью автоматической подстройки питающего напряжения в меньшую сторону для обеспечения устойчивой работы генератора. Основные параметры генератора импульсов с наносекундным фронтом приведены в таблице (п.6).

Выводы.

За сорок лет лидирующего положения ИИПТ НАН Украины в области создания мощных высоковольтных генераторов импульсных токов для электроразрядных технологий достигнут существенный прогресс в улучшении массогабаритных и энергетических характеристик ГИТ. Массогабаритные характеристики за этот период за счет использования в ЗУ звена промежуточной частоты улучшились на порядок, все созданные и в настоящее время работающие ГИТ имеют резонансную передачу энергии в зарядных контурах ГИТ, что обеспечивает максимально высокие энергетические характеристики (0,8–0,9) ЗУ. Проведенные разработки по повышению частоты следования импульсов позволили увеличить ее с уровня 1–2 Гц до 10 кГц. Важная технологическая характеристика – длительность фронта разрядного импульса в последних разработках сокращена до уровня 100 нс. Созданы ГИТ с адаптивными системами управления. Тенденции дальнейшего развития работ в области современного генераторостроения направлены на дальнейшее повышение технологических показателей, их стабильности, надежности оборудования, снижение материалоемкости, эксплуатационных расходов и удельных энергозатрат, улучшение уровня сервиса, экологической безопасности. Совершенствование оборудования приведет к улучшению приведенных показателей. На следующем этапе ожидается улучшение удельных массогабаритных показателей до уровня 5 кг/кВт, частоты преобразования – до 50–100 кГц, частоты следования импульсов – до 50 кГц, фронта импульса – до 10 нс.

1. Бойко Н. Научные основы создания электротехнологических установок для высоковольтных импульсных воздействий / Дис...докт.техн.наук: 05.09.13. – Харьков, 2003. – 564 с.

2. *Вовк И.Т.* Тенденции развития силового высоковольтного оборудования для ЭГИ // Техн. електродинаміка. – 2002. – №2. – С. 63–67.
3. *Вовченко А.И.* Высоковольтный высокочастотный импульсный источник питания для возбуждения и поддержки стримерного коронного разряда систем одновременной электрофльтрации и озонирования промышленных газов // Техн. електродинаміка. Тем. вип. „Силовая електроніка та енергоефективність”. – 2009. – Ч.4. – С. 35–38.
4. *Волков И.В., Губаревич В.Н., Исаков В.Н., Кабан В.П.* Принципы построения и оптимизации схем индуктивно-емкостных преобразователей. – Киев: Наук. думка, 1981. – 176 с.
5. *Исследовать и создать ряд высокоэффективных унифицированных блоков генераторов импульсных токов электрогидроимпульсных установок / Отчет о НИР (промеж.) / ПКБ Электрогидравлики АН Украины, рук. Друмирецкий В.Б. – № ГР 80004130, инв. 02840033252. – Николаев, 1983. – 193 с.*
6. *Исследовать процессы в зарядном устройстве ГИТ с промежуточным преобразованием частоты и схемах с постоянной потребляемой мощностью / Отчет о НИР (заключ.) / ИИПТ НАН Украины; рук. Мирошниченко Л.Н. – №ГР 01860023363; инв. № 02890068050. – Николаев, 1988. – 170 с.*
7. *Исследовать процессы в мощных высоковольтных высокочастотных источниках питания и разработать унифицированные зарядные устройства ГИТ для электроразрядных технологий (заключит.) / ИИПТ НАН Украины, рук. Мирошниченко Л. – № ГР 0102U004556, инв. 0205U006043. – Николаев, 2005. – 144 с.*
8. *Исследовать резонансные свойства транзисторных блоков для унифицированного ряда импульсных высоковольтных источников питания / Отчет о НИР (заключ.) / ИИПТ НАН Украины; рук. Мирошниченко Л.Н. – №ГР 01910009373; инв. № 03929001162. – Николаев, 1992. – 215 с.*
9. *Курач А.М., Мирошниченко Л.Н.* Разработка блоков ЗУ параметрического ряда ГИТ ЭГУ // Теория, эксперимент, практика разрядно-импульсных технологий: Сб. науч. трудов. – К.: Наук. думка, 1987. – С.161–163.
10. *Мирошниченко Л.М.* Аналіз варіантів побудови потужних високовольтних високочастотних трансформаторів для електроразрядних технологій // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2004. – №4(397). – С. 130–136.
11. *Мирошниченко Л.Н.* Зарядные устройства ГИТ с промежуточным преобразованием частоты // Техн. електродинаміка. Тем. вип. „Силовая електроніка та енергоефективність”. – 2001. – Ч.1. – С. 13–16.
12. *Мирошниченко Л.Н.* Зарядные устройства ГИТ с адаптивными системами управления // Техн. електродинаміка. Тем. вип. „Силовая електроніка та енергоефективність”. – 2006. – Ч.5. – С. 19–22.
13. *Мирошниченко Л.Н.* К вопросу особенностей создания мощных высоковольтных высокочастотных зарядных устройств ГИТ // Техн. електродинаміка. – 2000. – №5. – С. 52–55.
14. *Мирошниченко Л.Н.* Оптимизация элементов зарядных устройств ГИТ // Энергетическое оборудование высоковольтных импульсных установок. Сб. науч. трудов. – К.: Наук. думка, 1986. – С. 28–33.
15. *Мирошниченко Л.Н., Блинцов В.С., Касьянов Ю.И.* Резонансные зарядные устройства ГИТ. – К.: Наук. думка, 1990. – 116 с.
16. *Провести исследования и разработать на основе кремниевых выпрямительных столбов ряд малогабаритных зарядно-выпрямительных устройств для электрогидравлических установок / Отчет о НИР (заключ.) / ПКБ Электрогидравлики АН Украины; рук. Заварихин В.А. – №ГР74005410. – Инв. Б542826. – Николаев, 1976. – 130 с.*
17. *Создать генератор импульсных токов для ЭГИ установок с интенсифицированными процессами с частотой до 100 Гц, энергией в импульсе до 2 кДж, рабочим напряжением 50 кВ / Отчет о НИР (заключит.) / ПКБ Электрогидравлики АН Украины, рук. Курач А.М. – №ГР 78004366, инв. Б897036. – Николаев, 1980. – 226 с.*
18. *Шидловський А.К., Липківський К.О.* Розвиток досліджень по перетворенню та стабілізації параметрів електромагнітної енергії в Інституті електродинаміки НАН України // Техн. електродинаміка. – 2007. – №3. – С. 11–26.

Надійшла 04.01.2010