

Взрывные

ПЬЕЗОГЕНЕРАТОРЫ

В. Д. САДУНОВ

Начало систематического изучения сегнетоэлектрических материалов приходится на 30-е гг. прошлого столетия, когда И. В. Курчатов в СССР, Дж. Валашек в США и Г. Буш в Швейцарии обнаружили, что электрическая поляризация у сегнетовой соли и ряда других диэлектрических кристаллов может возникать и существовать в отсутствие электрического поля. В 50-е гг. были созданы поликристаллические сегнетоэлектрические материалы – пьезокерамики, сначала на основе титаната бария ($BaTiO_3$), а затем на основе твердых растворов цирконата-титаната свинца $Pb(Ti,Zr)O_3$. Уникальные пьезоэлектрические свойства этих материалов, способность изменять величину и направление спонтанной поляризации при сравнительно небольших внешних воздействиях определили их широкое применение в различных областях науки и техники.

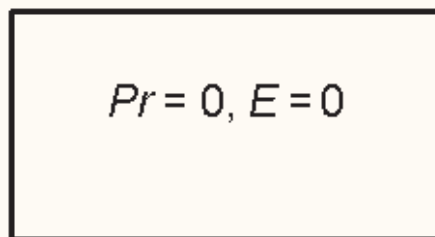
В исходном состоянии пьезокерамика представляет собой поликристаллический материал, составленный из конгломерата произвольно ориентированных спонтанно поляризованных кристаллитов. Под действием внешнего электрического поля направление спонтанной поляризации в кристаллитах может изменяться в направлении действующего поля. Это приводит к макроскопической поляризации пьезокерамики и сообщает ей пьезоэлектрические свойства, аналогичные по своим проявлениям свойствам линейных пьезоэлектриков.

В поляризованном состоянии пьезокерамику следует рассматривать как равновесную систему свободных и поляризационных зарядов, энергия взаимодействия которых минимальна, поскольку заряды распределены таким образом, что макроскопическое поле \vec{E} в объеме пьезокерамики отсутствует.

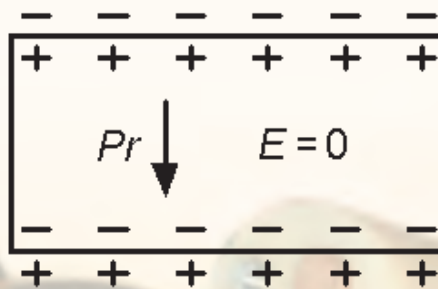
Взрывной пьезогенератор (ВПГ) является импульсным источником энергии однократного дей-

ствия и состоит из генератора ударной волны и пьезоэлектрического преобразователя энергии ударной волны в электрическую энергию.

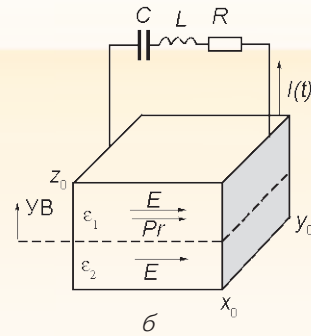
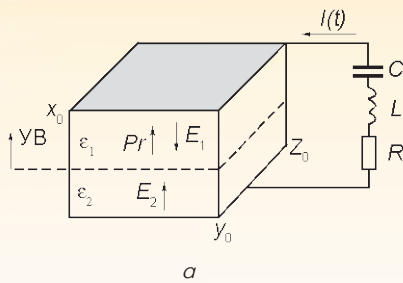
Первые сообщения о возможности применения взрывных пьезогенераторов были сделаны в 1949–1950 гг. В. А. Цукерманом и С. И. Борисовым, а в 1951 г. В. А. Головановым, Л. В. Татаринцевым, Ф. И. Дорошенко. В 1965 г. В. И. Карякиным, В. А. Родионовым, Г. И. Крашениниковым и Н. И. Ериным-Будниковым был выполнен анализ основных преимуществ применения ВПГ разработках института. Ими в качестве основных преимуществ взрывных пьезогенераторов перед конденсаторными накопителями энергии отмечались энергонезависимость, радиационная стойкость (до 10^{15} нейтронов на $см^2$), высокий гарантийный срок службы (более 15 лет).



Неполяризованная пьезокерамика



Поляризованная пьезокерамика



Схематическое изображение пьезоэлемента: 1 — несжатая зона, 2 — сжатая зона;

а — аксиальное нагружение (ударная волна распространяется от электрода к электроду), б — поперечное нагружение (ударная волна распространяется вдоль электродов пьезоэлемента)

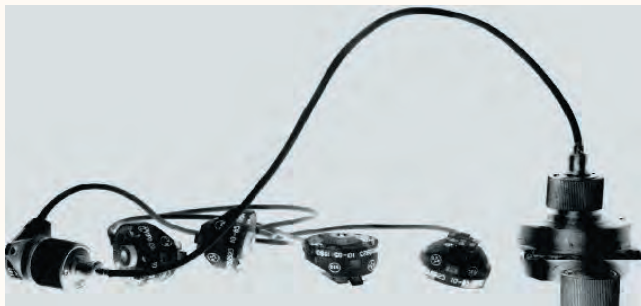
В 60-е гг. Г. И. Крашенинниковым под руководством Ю. В. Мирохина, Н. А. Казаченко, В. К. Чернышева, В. Н. Лобанова были разработаны первые действующие конструкции взрывных пьезогенераторов. Опыт, приобретенный в этот период, показал, что наряду с отмеченными достоинствами ВПГ имеют и существенные недостатки, состоящие в недостаточной стабильности и надежности их работы.

В 1968 г. Г. И. Крашенинников обращается к А. Г. Иванову (начальнику отдела ВНИИЭФ) с предложением провести совместные исследования причин нестабильности работы ВПГ и возможности их устранения. В этот период в отделе А. Г. Иванова был накоплен опыт по изучению электрических эффектов в ударно-нагруженных линейных диэлектриках. Поэтому предложение о проведении совместных исследований стало для группы сотрудников, возглавляемой Е. З. Новицким, естественным продолжением ранее выполняемых работ. В 1971 г. после отъезда Г. И. Крашенинникова все исследования по этой проблеме, в том числе и разработка новых конструкций ВПГ, при полной поддержке начальника отделения ОЗ Л. М. Тимонина перемещаются во вновь созданную лабораторию Е. З. Новицкого.

Мое участие в исследованиях, связанных с разработкой работоспособных конструкций ВПГ, относится к 1972 г. В 1973 г. мною в соавторстве с Е. З. Новицким была разработана модель электрической реакции пьезокерамики на ударно-волновое нагружение и теоретически обоснованы преимущества поперечной моды ударно-волнового нагружения пьезокерамики. В рамках предложенной модели было показано, что работа аксиального и поперечного ВПГ на нагрузку с произвольными параметрами может быть описана общим дифференциальным уравнением.

Разработка модели, удобной для практического применения, оказалась возможной потому, что во взрывных пьезогенераторах используются только такие интенсивности ударных волн, для которых в исходных положениях модели можно пренебречь влиянием ряда факторов, малосущественных для описания работы ВПГ.

При ударном нагружении пьезокерамики происходит изменение ее поляризации и нарушение равновесного распределения системы поляризационных и свободных зарядов. В зависимости от RLC параметров нагрузки ВПГ и моды ударного нагружения пьезокерамики распределение свободных зарядов на электродах пьезокерамики либо не изменяется, либо изменяется в зависимости от параметров нагрузки и величины ударной деполяризации пьезокерамики ΔP_r . В результате деполяризации в объеме пьезокерамики возбуждаются электрические поля, величина которых зависит от степени отклонения системы зарядов от своего равновесного состояния. Генерирование электрической энергии при этом происходит за счет работы, производимой ударной волной по перемещению в объеме керамики поляризационных зарядов против сил возбуждаемого в ней электрического поля. Эта работа и составляет существо процесса пре-



Пьезогенератор (справа) и подрываемые им 4 электродетонатора

образования энергии ударной волны в электрическую энергию.

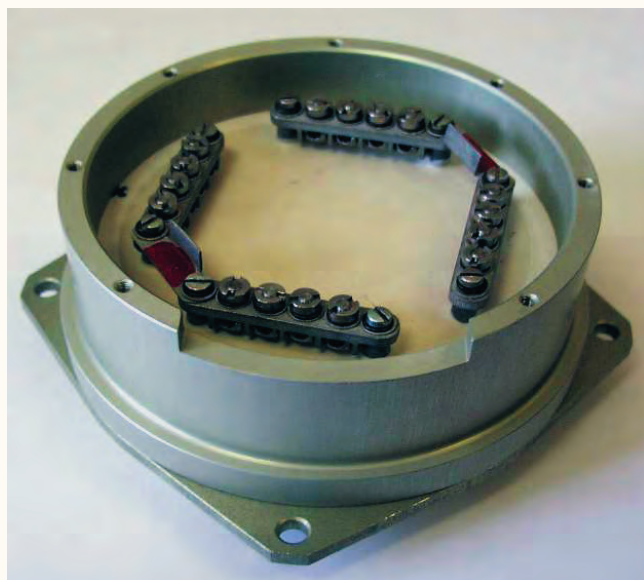
В рамках разработанной модели также было показано, что возможность описания аксиальной и поперечной моды ударно-волнового нагружения керамики с помощью одного и того же дифференциального уравнения не означает их одинаковой эффективности. В отличие от аксиальной моды, при поперечном нагружении электрические поля в объеме керамики регулируются как за счет параметров RLC-нагрузки, так и размерами пьезоэлектрического рабочего тела ВПГ. В аксиальном ВПГ в объеме пьезокерамики всегда реализуются предельные по величине электрические поля $E_{\max} = \Delta P_r / \epsilon \epsilon_0$, превосходящие, как правило, более чем на порядок электрическую прочность, $E_{\max} \gg E_{\text{пр}}$. Это свойство аксиальной моды нагружения и являлось основной причиной нестабильной работы первых конструкций ВПГ, разработанных в отделе Г. И. Крашенинникова. Переход к поперечной моде ударного нагружения решил указанную проблему и позволил в дальнейшем осуществить разработку эффективных и надежных конструкций ВПГ различного назначения.

В 1977 г. Ю. Б. Харитон, с учетом достигнутых нами результатов, утвердил техническое задание на выполнение следующего этапа НИР с названием «Пьезо-, пиро-, сегнетоэлектрические преобразователи энергии». При выполнении работ по новому техническому заданию с помощью разработанной расчетной модели были измерены электрофизические характеристики пьезокерамик при ударно-волновом нагружении и в сильных, быстро нарастающих электрических полях; разработаны ВПГ для подрыва электродетонаторов и других технических применений; разработана технология изготовления твердотельных электрических блоков ВПГ, методы контроля качества и обеспечения надежности взрывных пьезогенераторов.

По указанию Ю. Б. Харитона одна из конструкций ВПГ и соответствующий научный заказ были переданы в 1981–1982 гг. во ВНИИА, что послужило становлению там нового научно-технического направления работ.

В 1984–1985 гг. под руководством С. Г. Кочарянца при участии нескольких подразделений института было разработано техническое предложение и на его основе созданы действующие образцы взрывных пьезогенераторов, пригодные для практического применения в разработках института.

В 1985–1991 гг. проводятся разработки взрывных пьезогенераторов с целью их приме-



Пьезогенераторы с различной выходной энергетикой

нения в изделиях Министерства машиностроения. Созданные в ходе этих разработок взрывные пьезогенераторы и содержащие их образцы были успешно испытаны с изделиями НИИМаш (г. Дзержинск), а затем и организаций городов Коломны, Куйбышева и Калининграда Московской области.

Результаты выполненных исследований и разработок были представлены на семинарах и секциях НТС ВНИИЭФ, на внутренних и международных конференциях, публиковались в открытой печати. В дальнейшем эти результаты были использованы в моей кандидатской диссертации (1983 г.) и в докторской диссертации Е. З. Новицкого (1985 г.).



Пьезогенератор, размещенный в ударопрочном корпусе



Этим пьезогенератором для комплекса аварийной защиты можно пользоваться внутри помещения

Успех работ по созданию эффективных и надежных конструкций ВПГ был в значительной степени обеспечен за счет применения при разработке и изготовлении электрических блоков ВПГ высоконаполненного эпоксидного компаунда. Замена жидкой изоляции в конструкции электрических блоков ВПГ позволила отказаться от применения герметичных корпусов, компенсаторов температурного расширения жидкого диэлектрика, герметичных высоковольтных выводов, сложных методов крепления элементов в объеме электрических блоков генераторов. Применение компаунда позволило существенным образом упростить технологию изготовления, сократить сроки и стоимость разработки новых

конструкций ВПГ. По результатам разработки, исследования электрофизических характеристик и применения компаунда в конструкциях твердотельных электрических блоков ВПГ, стойких к действию эксплуатационных нагрузок, к условиям складского и полевого хранения, Т. В. Трищенко в 1990 г. была защищена кандидатская диссертация.

Разработка нового компаунда была осуществлена совместно с сотрудниками технологического отделения и защищена патентом. Авторами патента со стороны нашей лаборатории являлись Т. В. Трищенко, В. Д. Садунов, Е. З. Новицкий, а со стороны технологического отделения — Р. В. Кушникова, Е. Ф. Кременчугская, В. М. Мельниченко. В общей сложности по тематике, связанной с разработкой ВПГ, сотрудниками лаборатории было сделано более 20 изобретений.

Следует также отметить выполненную в лаборатории работу по исследованию сегнетоэлектрических переключающих устройств, практическое применение которых в конструкциях ВПГ позволило существенно расширить их функциональные возможности. Результаты исследований по этому направлению были использованы сотрудником нашей лаборатории И. Г. Толстиком при написании кандидатской диссертации.

Другой важной задачей, решение которой было абсолютно необходимо для обеспечения возможности создания надежных конструкций ВПГ со стабильными выходными характеристиками, стала разработка метода неразрушающего контроля критических параметров ВПГ. Контроль критических параметров ВПГ — устройства однократного действия, разрушающегося после своего использования, — позволял в рамках разработанной модели надежности оценивать качество изготовления и надежность работы создаваемых ВПГ. К критическим параметрам в модели надежности ВПГ были отнесены остаточная поляризация P_r и электрическая прочность $E_{пр}$ пьезокерамики.

Для осуществления неразрушающего контроля критических параметров ВПГ С. М. Батьяновым, сотрудником ИФВ, была разработана установка «АСНИ-Пьезо». При этом для обоснования возможности практического применения установки С. М. Батьяновым и сотрудниками нашей лаборатории была выполнена большая исследовательская работа, результаты которой подтвердили соответствие характеристик и возможностей установки целям, заявленным перед началом разработки.



Пьезодатчики различных типов

Разработкой метода неразрушающего контроля критических параметров ВПГ был фактически завершен исследовательский этап. На следующем этапе предполагалось осуществить на основе ВПГ целый ряд разработок.

К сожалению, в конце 80-х гг. произошло резкое сокращение финансирования работ как по тематике ВНИИЭФ, так и по тематике сторонних организаций. В результате успешно начатые и намеченные к разработке проекты с применением ВПГ перестали поддерживаться, и работы по ним были практически свернуты. Кризис в лаборатории обострился после ухода из нее Е. З. Новицкого и группы сотрудников и группы сотрудников на тематику, связанную с разработкой электрохимических генераторов. В этой непростой ситуации следует отметить неоценимый вклад в сохранение жизнеспособности лаборатории ее ведущих сотрудников и ветеранов: Т. В. Трищенко, А. В. Блинова, М. В. Коротченко, З. М. Пучковой, Н. А. Филипповой, В. Н. Коннова, — каждый из которых упорно работал, утверждая право лаборатории на дальнейшее существование.

В эти трудные времена лаборатория своим дальнейшим существованием в значительной степени была обязана поддержке директора ИФВ А. Л. Михайлова, который помог ей пополниться новыми кадрами, способствовал поиску и решению новых научно-технических задач.

После 1992 г. основным направлением лаборатории стали исследования и разработки, связанные преимущественно с выполняемыми во ВНИИЭФ работами в области обычных вооружений, а также с технологиями гражданского назна-

чения. В тот период было показано, что взрывные пьезогенераторы могут успешно применяться при разработке импульсных источников электромагнитного излучения, источников низкочастотного и экспоненциально спадающего поля, источников начальной запитки взрывомагнитных генераторов и зарядного тока конденсаторных накопителей энергии, генераторов подрывного импульса и систем группового подрыва в области гражданского производства.

В 90-е гг. были выполнены разработки адаптивной системы электрического инициирования; системы пьезоэлектрического инициирования для кумулятивных боевых частей; ВПГ для источника начальной запитки взрывомагнитных генераторов; системы инициирования, сохраняющей свою работоспособность в поле перегрузок; системы аварийной защиты окружающей среды от выбросов из производственных помещений радиоактивных и опасных в экологическом отношении веществ (система обеспечивает перекрытие вентиляционных и технологических каналов аварийного помещения за ~1,5 мс); системы группового подрыва скважинных зарядов горнодобывающей промышленности; методики испытаний на стойкость к разрядам статического электричества.

Другим важным направлением работ в лаборатории стало направление, связанное с разработкой пьезодатчиков, предназначенных для измерения временных и газодинамических параметров в опытах на полигонах ВНИИЭФ.

Были созданы помехоустойчивые миниатюрные датчики, удобные для установки в труднодоступных местах экспериментальных макетов, и разработаны на их основе новые измерительные методики, имеющие важное прикладное значение в исследованиях по тематике института. Все методики аттестованы и получили номера госрегистрации. Опыт эксплуатации этих методик показал их высокую информативность в условиях практического применения.

В тексте статьи приводятся фотографии ряда конструкций ВПГ различного назначения и пьезодатчиков, разработанных для регистрации параметров газодинамических процессов.

САДУНОВ Валерий Давидович —
начальник лаборатории ИФВ РЯЦ-ВНИИЭФ,
доктор технических наук