

ЛАБОРАТОРНАЯ  
ТЕХНИКА

УДК 537.572

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА  
ДИЭЛЕКТРИКИ

© 2026 г. Ю. Э. Адамьян\*, Г. Е. Губкин, И. Б. Кузнецов, С. И. Кривошеев,  
С. Г. Магазинов

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29*

*\*e-mail: wiradam@rambler.ru*

Поступила в редакцию 09.02.2026 г.

После доработки 25.02.2026 г.

Принята к публикации 20.03.2026 г.

Представлено описание экспериментальной установки для исследования влияния механического нагружения пленочных диэлектриков на их импульсную электрическую прочность. Новизна работы состоит в использовании для механического нагружения магнитно-импульсного метода, позволяющего расширить диапазон механических напряжений в образцах в область пластического течения. Система создания механической нагрузки обеспечивает уровень точности воспроизведения деформации  $\pm 5\%$ . Точность определения средней величины пробивного напряжения определяется статистическим разбросом свойств диэлектрика. Для создания механической нагрузки образцов используется генератор импульсных токов, питающий два многовитковых спиральных индуктора. Импульсы электрического воздействия имеют форму фронта, близкую к линейно нарастающей. Проведенная серия измерений на образцах из полиэтилентерефталатной пленки толщиной 90 мкм показала, что максимум электрической прочности примененных образцов наблюдается при уровне относительной деформации порядка 1.0–1.1%, при котором пластичность материала еще заметно не проявляется.

**Ключевые слова:** электрическая прочность, пленочный диэлектрик, магнитно-импульсный метод, механические напряжения, деформация

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Широкое использование пленочных диэлектриков в электротехнических объектах, подвергающихся механическому воздействию, требует знания влияния механического нагружения на электрические характеристики диэлектрика, в частности, на пробивную напряженность электрического поля. Значительная доля опубликованных материалов на данную тему посвящена квазистатическому нагружению с точки зрения как механики, так и электрического воздействия [1, 2]. В некоторых работах исследовалось также воздействие стандартного грозового импульса напряжения в сочетании со статической механической нагрузкой [3]. Общим трендом результатов, опубликованных на данную

тому, является снижение электрической прочности материала, находящегося под механической нагрузкой. Однако в ряде случаев наблюдается обратный эффект – повышение пробивного напряжения при росте механической нагрузки [4], что ставит вопросы к теоретическим исследованиям на данную тему. В уже процитированной работе [3] электрическая прочность полиимидных листов на переменном токе в жидком азоте при температуре 77 К значительно увеличивается по мере увеличения растягивающих напряжений.

Таким образом, продолжение сбора информации на затронутую тему является актуальным как с практической точки зрения, так и с точки зрения развития теоретических представлений в области физики диэлектриков.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является создание экспериментального стенда для исследования воздействия импульсного высокого напряжения на пленочный диэлектрик, подвергнутый одноосному растяжению в квазистатическом режиме. Для создания механических нагрузок используется магнитно-импульсный метод, обеспечивающий широкий диапазон вариации амплитуды воздействия и высокую степень воспроизводимости импульса давления [5].

Задачами работы являются разработка и реализация

- генератора импульсных напряжений с формой фронта импульса выходного напряжения, близкой к линейно нарастающей, и амплитудой, достаточной для пробоя образца на фронте импульса;
- генератора импульсных токов (ГИТ) с использованием емкостного накопителя энергии для питания индукторов системы магнитно-импульсного нагружения образца диэлектрика;
- узла нагружения образца, сочетающего в себе условия для приложения к образцу высоковольтного импульса в электрическом поле, близком к однородному, и механического растяжения образца в направлении, перпендикулярном к вектору электрического поля в области пробоя;
- системы регистрации формы импульсного напряжения на образце и механических напряжений в области воздействия электрического поля.

Также необходимо провести тестовую серию измерений с использованием пленочного диэлектрика, сопровождаемую моделированием механической части задачи для верификации измерений.

## 3. ОЦЕНКА ТРЕБУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исходя из известных данных о значительном статистическом разбросе пробивных напряжений пленочных диэлектриков [6, 7], мы считаем принципиальным моментом создание хорошо воспроизводимых условий как механического, так и электрического нагружения. Для выбора вида механического нагружения определяющей является возможность воспроизведения условий нагружения при пластическом течении материала. Данное условие исключает использование статического нагружения, которое применено в работах [4, 8]. С учетом этого выбран магнитно-импульсный метод механического нагружения с характерным временем приложения нагрузки порядка 1 мс и подачей высоковольтного электрического импульса в максимуме механической деформации. В предлагаемой работе рассматривалась отработка технологии проведения экспериментов с образцами, изготовленными из биаксиально-ориентированного полиэтилентерефталата (ПЭТФ). В предварительных экспериментах без механического нагружения были опробованы конфигурации зоны разряда (толщина и ширина образца в виде полосы), обеспечивающие пробой в поле, близком к однородному, в среде трансформаторного масла. В результате были выбраны ширина образца 14 мм и толщина  $90 \pm 10$  мкм. При этом радиус закругления полусферических электродов для приложения электрического поля соответствует ширине образца. В продольном направлении образец имеет вид ленты длиной около 200 мм, определяемой размерами узла нагружения.

Электрический пробой твердого диэлектрика в условиях стационарного электрического поля может обуславливаться различными механизмами. В области времен  $10^{-10} - 10^{-6}$  с пробой, согласно различным точкам зрения, может быть обусловлен лавинным [9] или ионизационным [10] механизмами. Характерные времена для теплового пробоя составляет  $10^{-6} - 10^2$  с. Импульсные пробивные напряжения полимеров для микросекундного диапазона времени могут довольно сложным образом зависеть от времени. Для выделения зависимости условий электрического пробоя от механического напряжения в образцах на начальной стадии имеет смысл использовать область времени электрического воздействия, достаточно просто воспроизводимого экспериментально и не вызывающего серьезных проблем при измерениях. Для большинства полимеров с этой точки зрения наиболее удобными является время длительностью порядка микросекунды. Более короткое время приложения напряжения вызывают достаточно резкий рост пробивного напряжения по сравнению с квазистатическим режимом, более длительное дает возможность развития побочных процессов, связанных с ионизационными процессами в окружающей среде (жидком диэлектрике).

#### 4. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

##### 4.1. Узел нагружения образца

Центральной частью экспериментальной установки является узел нагружения образца, выполненный из диэлектрического материала (капролон). Расположение элементов узла нагружения схематически показано на рис. 1. Испытуемый образец 1 растягивается с помощью диэлектрических зажимов, которые плотно прилегают к алюминиевым дискам 5 (показана только одна из сторон симметричной системы) магнитно-импульсного нагружения. Центральная часть образца расположена между электродами 2 и 3, причем первый электрод заземлен, а второй подключен к выходу источника высоковольтных импульсов.

**Рис. 1.** Расположение элементов узла нагружения

Для исключения пробоя по поверхности образца на заземленный нижний электрод 2 надевается диэлектрическая обечайка 6 с прорезями, обеспечивающими свободное перемещение образца. Во время эксперимента полость, образуемая нижним электродом и обечайкой, заполняется трансформаторным маслом. Магнитное давление, создаваемое индукторами 4, воздействует на диски 5, создавая в образце растягивающее механическое напряжение.

Схема установки, приведенная на рис. 2, объединяет в себе модули механического и электрического воздействий.

**Рис. 2.** Электрическая схема установки

#### *4.2. Генератор импульсных напряжений*

Выбор схемы и параметров генератора импульсных напряжений обуславливается соображениями согласования характеристик механического нагружения с электрическим воздействием. В этой связи приходится принимать в расчет механические и электрические характеристики используемого материала, а также геометрические размеры образца.

Данные разных авторов об электрической прочности ПЭТФ сильно расходятся [11, 12]. Данное обстоятельство, вероятно, связано с технологическими особенностями производства диэлектрика.

Выбор уровня выходного напряжения установки определяется пробивной прочностью испытуемого диэлектрика. Оценки показывают, что при пробивной напряженности диэлектрика  $E_{пр} \sim 300$  кВ/мм для испытаний пленки толщиной 90 мкм достаточный уровень амплитуды косоугольного импульса не превышает 30 кВ. Для проведения испытаний был выбран временной диапазон порядка сотен наносекунд, в котором ограничена возможность развития вторичных разрядных процессов, препятствующих исследованию собственно пробоя диэлектрика, и не наблюдается существенного роста электрической прочности.

Для генерации электрического воздействия была выбрана трансформаторная схема на основе воздушного трансформатора. Разряд конденсатора  $C_1$  емкостью 0.22 мкФ, заряжаемого до напряжения 10 кВ, осуществлялся с помощью разрядника  $P_1$  типа РУ-62. Коэффициент трансформации  $K_{тр}$  воздушного трансформатора (ВТ) равен 6. Формирование фронта импульса нужной длительности осуществляется с помощью фронтового конденсатора  $C_{фр}$  на выходе генератора, состоящего из семи последовательно включенных конденсаторов емкостью 470 пФ. Для ограничения тока разряда и уменьшения уровня помех используется демпферный резистор  $R_{дф}$ , через который напряжение генератора прикладывается к разрядному промежутку. Регистрация осциллограмм напряжения на разрядном промежутке осуществляется компенсированным резистивно-емкостным делителем напряжения  $R_{д1}$ ,  $R_{д2}$ ,  $C_{д2}$  с коэффициентом деления 1800.

По данным испытаний в режиме отсутствия пробоя фронт импульса напряжения сохраняет форму, близкую к линейной, вплоть до напряжения 40 кВ, что значительно превышает ожидаемую величину электрической прочности образца. Для обеспечения воспроизводимости экспериментов зарядное напряжение конденсатора не варьировалось. Таким образом, в опытах с изменением механической нагрузки сохранялась крутизна фронта импульса напряжения, а вариация пробивного напряжения приводила к изменению длительности срезанного импульса в пределах линейности фронта. Типичная форма импульса напряжения показана на рис. 3.

**Рис. 3.** Типичная форма импульса напряжения на электродах при пробое образца

Отрицательный выброс на осциллограмме после момента пробоя связан с колебательным разрядом фронтовой емкости на индуктивность присоединения электродов к генератору, он не влияет на точность измерения напряжения пробоя.

#### 4.3. Генератор импульсных токов

Для формирования механической нагрузки в образце используется ГИТ на основе емкостного накопителя энергии суммарной емкостью  $C_2 = 40$  мкФ с рабочим напряжением 2–4 кВ. Максимальная запасаемая энергия  $W_{\max} = 320$  Дж. Коммутация осуществляется разрядником  $P_2$  типа РУ-69. Нагрузкой генератора являются два последовательно включенных спиральных индуктора, закрепленных по обеим сторонам модуля нагружения. При протекании тока разряда генератора кольцевые алюминиевые диски, расположенные с внешних сторон индукторов, испытывают воздействие магнитного давления со стороны магнитного поля. Механическое усилие через плотно прижатые к дискам зажимы передается образцу.

Амплитуда и форма импульса механического напряжения в центральном сечении образца определяются его размерами и механическими характеристиками материала, а также массой зажимов. Для выявления связи параметров механического нагружения с формой импульса тока индукторов при проектировании системы был проведен конечно-элементный механический расчет в среде COMSOL Multiphysics. Использовалась модель вязкоупругого деформируемого материала, в качестве которого был выбран полиэтилентерефталат. Для расчета использованы данные из работ [13, 14]. Расчет показал возможность воспроизведения требуемого режима деформирования образца с однозначной связью между зарядным напряжением ГИТ  $U_{зар2}$ , амплитудой относительной деформации в рабочей области  $\varepsilon_{max}$  и временем ее достижения  $t_{max}$ .

При максимальном зарядном напряжении 4 кВ амплитуда разрядного тока ГИТ составляет около 16 кА, период колебаний равен 70 мкс. Декремент затухания близок к 1. Расчетная амплитуда магнитного поля между индуктором и диском достигает  $B \approx 4$  Тл, что соответствует величине магнитного давления  $B^2 / 2\mu_0 = 6.4 \cdot 10^6$  Па. Данная величина, определяющая уровень механических нагрузок на элементы индуктора и диски, далека от предельных значений допустимых механических нагрузок использованных конструкционных материалов, она не предъявляет специальных требований к технологии изготовления элементов механического нагружения. Тепловыделение в индукторах составляет около 10 Дж за импульс и не приводит к их значительному нагреву.

Вследствие недостаточно точного знания прочностных характеристик материала образца полученные путем расчета данные имеют лишь качественное соответствие с реальным процессом его деформирования. Для получения реальной зависимости  $\varepsilon_{max}$  и  $t_{max}$  от  $U_{зар1}$  была проведена серия измерений с помощью тензометрического моста без приложения импульса высокого напряжения для образца размерами  $200 \times 14 \times 0.09$  мм<sup>3</sup>. Использованы тензометры BF350\_3AA в сочетании с операционным усилителем AD8421. Система была предварительно калибрована с точностью  $\pm 10\%$ , определяемой точностью даваемого производителем датчиков коэффициента тензочувствительности.

Достигнутая в экспериментах максимальная амплитуда деформации в центре образца, равная 1.3%, еще не соответствовала его разрыву, хотя в частях, близких к зажимам, наблюдались заметные остаточные деформации. Измерения показали хорошую степень воспроизводимости и позволили для каждой величины зарядного напряжения определить момент подачи импульса высокого напряжения, соответствующий вершине импульса деформации.

На рис. 4 представлены расчетные и экспериментальные кривые относительной деформации в центре образца при зарядных напряжениях ГИТ 2, 3, 4 кВ.

**Рис. 4.** Расчетные (сплошные) и экспериментальные (пунктирные) кривые относительной деформации в центре образца при зарядных напряжениях ГИТ:

Сопоставление расчета и эксперимента является удовлетворительным, при этом знак разности расчетных и экспериментальных данных меняется в зависимости от напряжения. Это говорит об условном характере применимости модели вязкоупругого материала. При проведении экспериментов с подачей высоковольтного импульса для пробоя диэлектрика синхронизация разрядников  $P_2$  и  $P_1$  осуществлялась с учетом кривых зависимости деформации от времени, соответственно, время задержки запуска генератора импульсных напряжений менялось от 800 до 1000 мкс. К этому времени высокочастотные осцилляции импульса давления, связанные с разрядом ГИТ, полностью затухают, не оказывая влияния на результаты экспериментов по электрическому пробую.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВОЙ СЕРИИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Всего было проведено 42 эксперимента, в том числе серия без механического нагружения и серия при вариации зарядного напряжения модуля механического нагружения от 2 до 4 кВ. Каждому из режимов с механическим нагружением может быть поставлена в соответствие величина относительной деформации в зоне пробоя по данным тензометрических измерений. Результаты измерений представлены на рис. 5.

**Рис. 5.** Зависимость средней величины пробивного напряжения ( $U_{пр}$ ) от относительной деформации при растяжении образцов

В качестве полос погрешности на графике представлены величины доверительного интервала при уровне значимости  $\alpha = 0.15$ . Несмотря на значительный разброс пробивных напряжений в пределах заданного режима, имеется статистически значимое превышение электрической прочности образца при величине относительной деформации около (1.0 – 1.2)% над величиной, полученной без механического нагружения. Дальнейшее увеличение степени деформирования в данных условиях сопровождается снижением электрической прочности, остающейся, тем не менее, более высокой, чем в отсутствие механического нагружения.

При соответствующей подготовке время, затрачиваемое на проведение одного эксперимента, включая замену образца, составляло около 15 мин. Однако при планировании экспериментов следует учесть значительные временные затраты на проведение тензометрических измерений, которые можно сократить, используя адекватное компьютерное моделирование.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе работы создана экспериментальная установка, позволяющая исследовать импульсный пробой пленочного диэлектрика косоугольным импульсом напряжения с амплитудой до 40 кВ, подвергнутого воздействию растягивающего напряжения до 40 МПа. Проведенная тестовая серия экспериментов показала, что все поставленные задачи работы в целом решены. Установка позволяет реализовать контролируемое одноосное растяжение образца в диапазоне значений деформации, включающем в себя пластическое течение. Получена зависимость пробивного напряжения от величины механической деформации, имеющая достаточно хорошо выраженный максимум в практически важной области

$\varepsilon \approx 1\%$  (такая величина относительной деформации может соответствовать рабочему режиму при эксплуатации в упругой зоне). Пленочная ПЭТФ-изоляция, использованная в качестве модельной, продемонстрировала увеличение пробивной прочности до 20% при упругом деформировании. При этом чувствительность пробивной прочности к относительной деформации материала не превышает 0.4 В/мк при данной толщине диэлектрика. Имеется техническая возможность усложнить схему механического нагружения за счет приложения статической или импульсной нагрузки к подвижному верхнему электроду, приблизив ее таким образом к условиям работы в магнитных системах типа многовиткового соленоида.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке ГК Росатом и Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Федерального проекта 3 (ФПЗ), проект № FSEG-2025-0005 “Разработка конструкторских и технологических решений по обеспечению механической прочности и охлаждению центрального соленоида токамака ТРТ”.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Слуцкер А.И., Гиляров В.Л., Поликарпов Ю.И.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. № 11. С. 60.  
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20323630>
2. *Слуцкер А.И., Велиев Т.М., Алиева И.К., Алекперов В.А., Поликарпов Ю.И., Каров Д.Д.* // ФТТ. 2017. Т. 59. № 1. С. 183.  
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28969451>



3. *Song M., Cao K.N., Wang D.D., Yang X., Wei B.* // IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices. Beijing. IEEE. 2013. P. 476.  
<https://doi.org/10.1109/ASEMD.2013.6780824>
4. *Жога Л.В., Шнейзман В.В.* // ФТТ. 1992. Т. 34. № 8. С. 2578.  
<https://www.mathnet.ru/rus/ftt7673>
5. *Алексеев Д.И.* Высокоскоростное деформирование пластичных материалов магнитно-импульсным методом. Дис. ...канд. техн. наук. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2024. 115 с.  
<https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/r25-27>
6. *Semenov S.E.* // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2024. V. 17. No. 2. P. 141. <https://doi.org/10.18721/JPM.17211>
7. *Given M.J., Wilson M.P., Timoshkin I.V., MacGregor S.J., Wang T., Sinclair M.A., Thomas K.J., Lehr J.M.* // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2017. V. 2. № 4. P. 2115. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2017.006314>
8. *Song M., Cao K.N., Wang D.D., Yang X., Wei B.* // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2014. V. 24. № 5. P. 1. <https://doi.org/10.1109/tasc.2014.2344760>
9. *Zhao L., Su J.C., Liu C.L.* // AIP Advances. 2020. V. 10. № 3. P. 035206.  
<https://doi.org/10.1063/1.5110273>
10. *Закревский В.А., Пахотин В.А., Сударь Н.Т.* // ЖТФ. 2017. Т. 87. № 2. С. 249.  
<https://doi.org/10.21883/JTF.2017.02.44133.1907>
11. *Важов В.Ф., Молдобаев К.Д.* // Электричество. 2009. № 12. С. 89.  
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12955752>
12. *Закревский В.А., Пахотин В.А., Сударь Н.Т.* // ЖТФ. 2019. Т. 89. № 1. С. 120.  
<https://doi.org/10.21883/JTF.2019.01.46972.98-18>
13. *Ефимов А.В., Баженов С.Л., Бобров А.В., Гроховская Т.Е.* // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2017. Т. 59. № 3. С. 234.  
<https://doi.org/10.7868/S2308112017030038>
14. *Род В.А., Утехин А.Н., Кондратов А.П.* // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2024. Т. 86. № 3. С. 223.  
<https://doi.org/10.20914/2310-1202-2024-3-223-230>

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

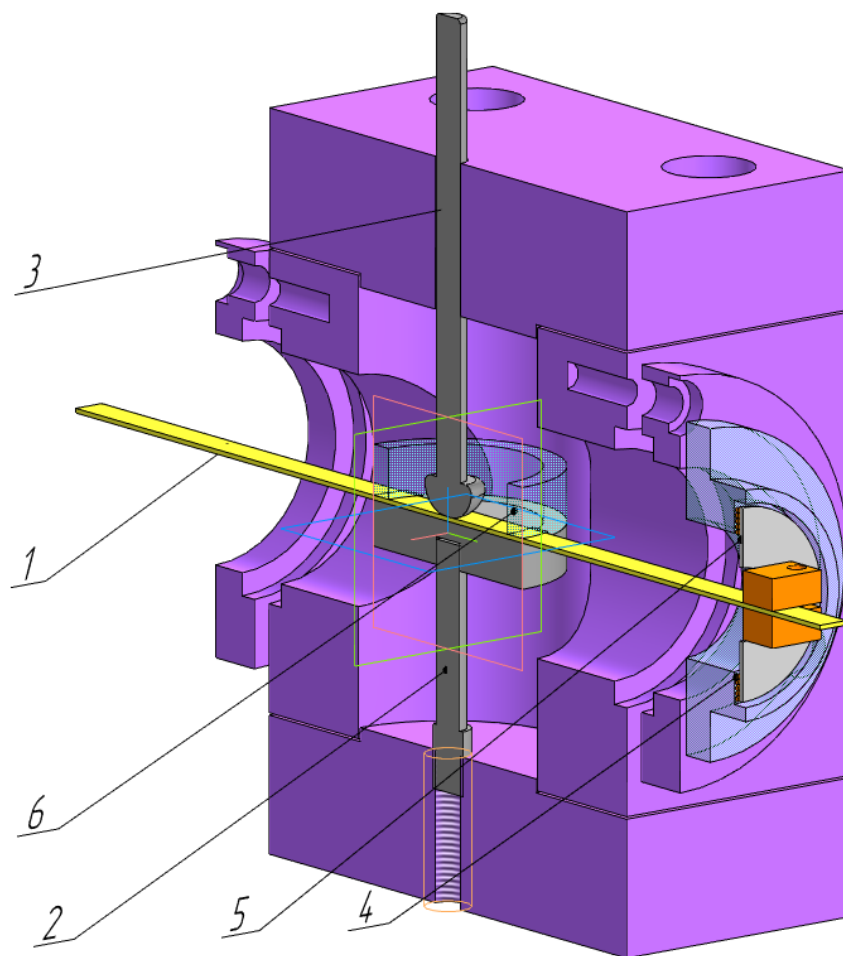
**Рис. 1.** Расположение элементов узла нагружения: 1 – образец, 2, 3 – электроды, 5 – алюминиевые диски, 4 – индукторы, 6 – диэлектрическая обечайка.

**Рис. 2.** Электрическая схема установки.

**Рис. 3.** Типичная форма импульса напряжения на электродах при пробое образца.

**Рис. 4.** Расчетные (сплошные) и экспериментальные (пунктирные) кривые относительной деформации в центре образца при следующих значениях зарядных напряжений ГИТ: 1 – 4 кВ, 2 – 3 кВ, 3 – 2 кВ.

**Рис. 5.** Зависимость средней величины пробивного напряжения от относительной деформации при растяжении образцов.



**Рис. 1.**

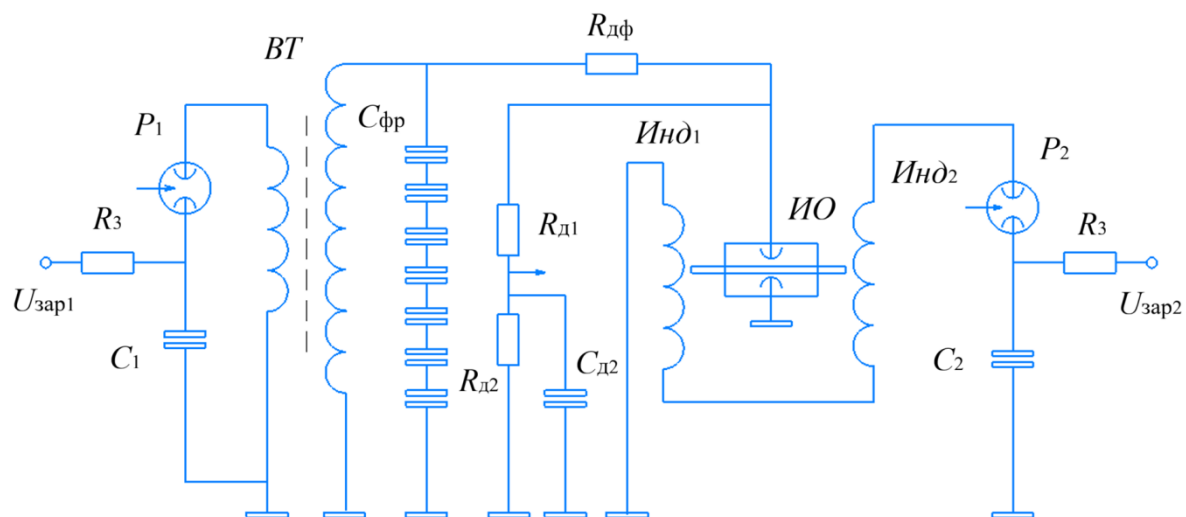
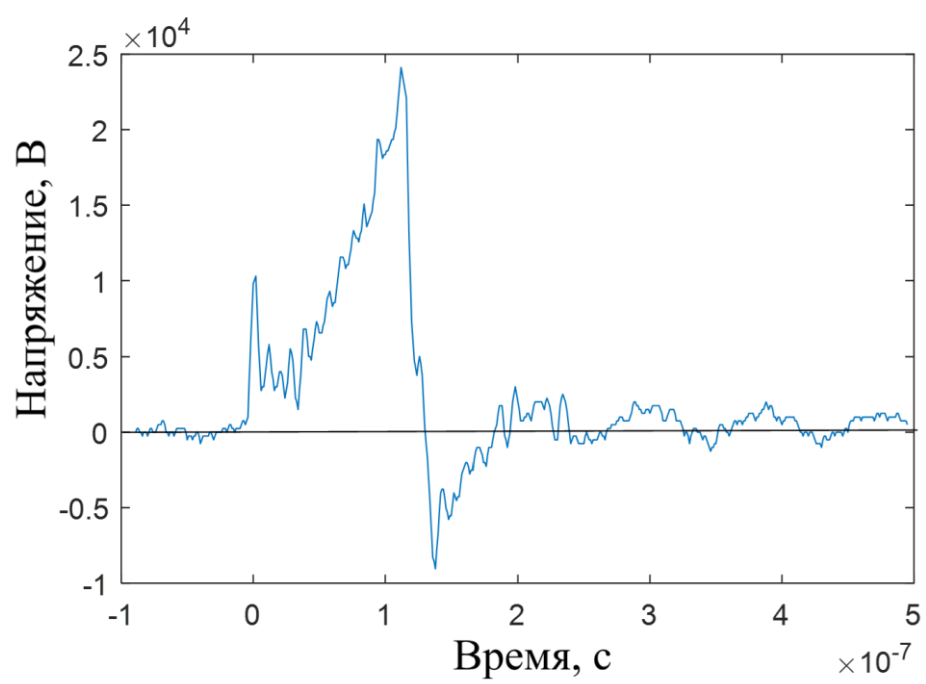


Рис. 2.



**Рис. 3.**

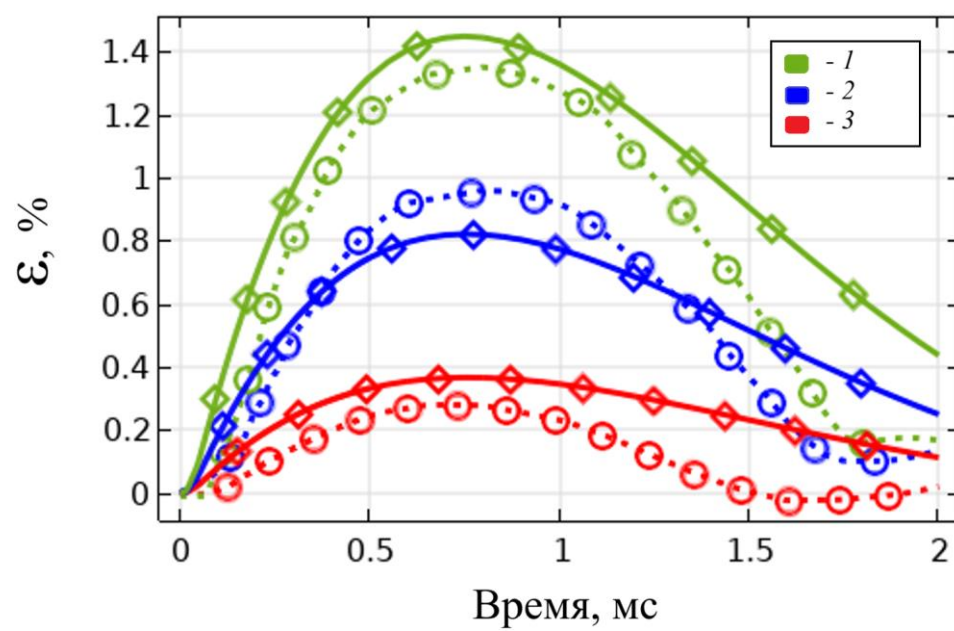
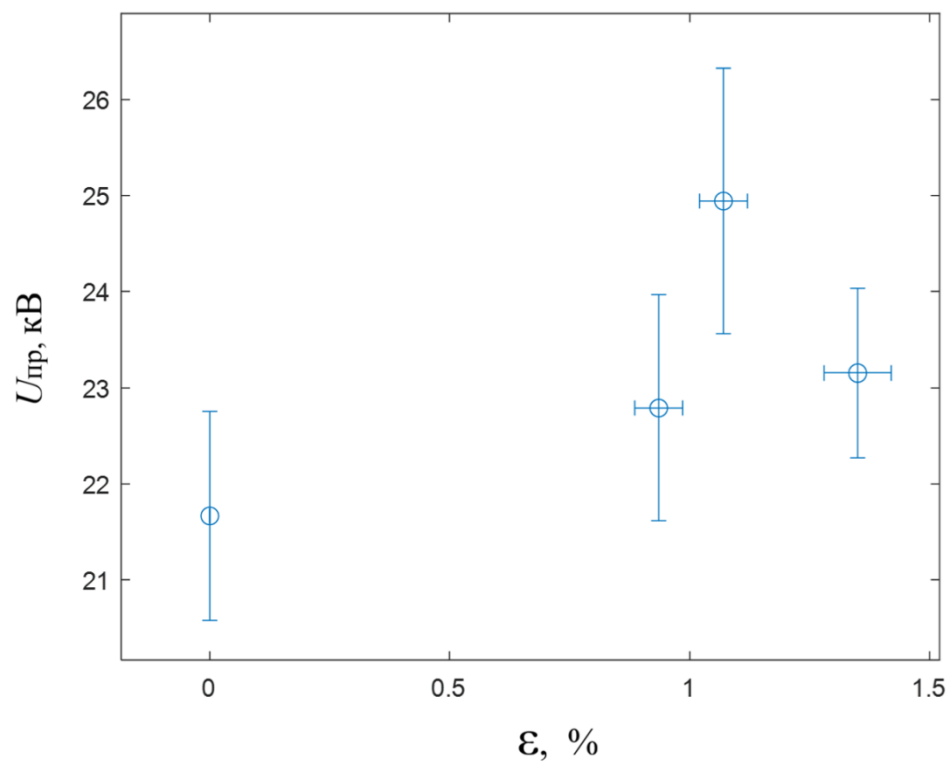


Рис. 4.



**Рис. 5.**