

**ЭЛЕКТРОНИКА
И РАДИОТЕХНИКА**

УДК: 621.373.54

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОММУТАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ
ЭНЕРГИИ В ДИНИСТОРАХ С УДАРНОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ ОТ
ТЕМПЕРАТУРЫ ИХ СТРУКТУР**

© 2026 г. С. В. Коротков*, А. Л. Жмодиков, К. А. Козлов, Д. А. Коротков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

** E-mail: korotkov@mail.ioffe.ru*

Поступила в редакцию 22.04.2026

После доработки 07.05.2026

Принята к публикации 15.05.2026

Приведены результаты исследований промышленно выпускаемых динисторов с ударной ионизацией ДУИ-113-10 в режиме коммутации импульсов тока с амплитудой 2000 А и длительностью 300 нс при изменении температуры их структур в диапазоне от -30 до $+80$ °С. Показано, что в этом режиме коммутационные потери энергии в динисторах малы и монотонно увеличиваются в диапазоне от 40 до 80 мДж. При испытаниях ДУИ-113-10 в режиме коммутации импульсов тока с амплитудой 1.3 кА и длительностью 200 нс, следующих с частотой 200 Гц, получен малый нагрев их структур. В естественных условиях без принудительного охлаждения он составил примерно 15 °С.

1. ВВЕДЕНИЕ

Разработанные в ФТИ им. А.Ф. Иоффе четырехслойные динисторы с ударной ионизацией (ДУИ) имеют два электрода (анод, катод) и S-образную вольт-амперную характеристику при положительном напряжении на аноде. Они относятся к классу кремниевых структур тиристорного типа [1–3], которые способны переключаться в хорошо проводящее состояние за время менее наносекунды при приложении короткого импульса перенапряжения. Если фронт запускающего импульса перенапряжения мал (не дольше 2–3 нс), то инжектированные из эмиттерных слоев тиристорной структуры электроны и дырки не успевают обеспечить известные условия для ее переключения под воздействием эффекта dU/dt . В результате напряженность поля вблизи коллекторного перехода может достигнуть значения, достаточного для ударной ионизации кремния. Ударная ионизация обеспечивает быстрое переключение тиристорной структуры в состояние с высокой проводимостью.

Основным отличием ДУИ [4] является то, что в эмиттерные p^+ - и n^+ -слои его четырехслойной структуры введены выходы на контакт (шунты), которые расположены соосно и имеют, соответственно, проводимости n - и p -типов. Шунты равномерно распределены по площади структуры ДУИ на расстоянии около 1 мм друг от друга и имеют диаметры примерно 400 мкм.

В процессе нарастания запускающего напряжения шунты существенно снижают интенсивность инжекции носителей из прилегающих к ним участков эмиттеров. В результате условия инициирования ударной ионизации в приколлекторной области достигаются при более высоком уровне напряжения, и интенсивность процесса ударной ионизации возрастает. Сильное влияние шунтов на процесс переключения ДУИ позволяет предположить, что их равномерное расположение может обеспечить достаточно однородное по площади включение ДУИ.

Ударная ионизация обеспечивает заполнение базовых областей ДУИ хорошо проводящей электронно-дырочной плазмой за время около 1 нс. В результате создается возможность эффективной коммутации килоамперных импульсов тока, нарастающих с рекордной для традиционных полупроводниковых приборов скоростью в сотни А/нс.

Процесс ударной ионизации в четырехслойной полупроводниковой структуре в настоящее время изучен недостаточно полно. Имеются факторы, которые могут существенно влиять на его интенсивность при изменении температуры структуры. Поэтому актуальным является проведенное в этой работе экспериментальное исследование зависимости коммутационных потерь энергии в ДУИ от температуры их структур в широком диапазоне ее изменения.

В настоящей работе приведены результаты тепловых исследований ДУИ113-10 с диаметром структур 16 мм, изготовленных в ПАО “Электровыпрямитель” из пластин кремния с удельным сопротивлением 90 Ом·см и толщиной 400 мкм. Исследуемые диносторы имели рабочее напряжение 2.5 кВ. При скорости нарастания запускающего напряжения более 800 В/нс они включались при напряжении U_m не менее 3.6 кВ. Время переключения в состояние с высокой проводимостью составляло около 1 нс.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Тепловые исследования ДУИ проводились на испытательном стенде (рис. 1) при использовании разработанного генератора импульсов, который обеспечивал включение ДУИ и протекание через него мощного импульса силового тока.

Рис. 1. Функциональная схема стенда для температурных исследований ДУИ.

В исходном состоянии конденсатор силовой цепи C_0 заряжен до напряжения U_0 . Это напряжение приложено к ДУИ. Диод D_1 препятствует приложению напряжения U_0 к коммутатору импульсов запуска ДУИ, выполненному в виде блока последовательно соединенных дрейфовых диодов с резким восстановлением (ДДРВ) [5].

Формирование запускающего импульса высокого напряжения осуществляется следующим образом. Сначала через блок ДДРВ с помощью цепи управления (ЦУ) пропусклся короткий прямой ток, обеспечивающий накопление заряда в структурах диодов. В момент окончания этого тока ЦУ коммутирует в блок ДДРВ быстро нарастающий обратный ток. В результате накопленный заряд выносится из диодных структур, они синхронно выключаются, и протекающий через блок ДДРВ ток I_y за время около 2 нс коммутируется в цепь D_1 –ДУИ. Диод D_2 исключает возможность отклонения этого тока в силовую цепь.

Ток I_y является током управления ДУИ, он обеспечивает быструю зарядку его собственной емкости. В результате напряжение на ДУИ резко нарастает до величины напряжения включения U_m , при котором в структуре ДУИ инициируется процесс ударной ионизации. После включения через ДУИ протекает силовой ток I , являющийся током разряда конденсатора C_0 . Амплитуда и длительность импульса тока I определяются емкостью и напряжением зарядки конденсатора C_0 , монтажной индуктивностью цепи разряда C_0 , а также коммутационными потерями энергии в ДУИ. Поскольку эти потери малы, после окончания импульса силового тока в конденсаторе C_0 остается энергия, которая рассеивается в цепи R_0 – D_0 .

Исследуемый динистор подключался к выходу генератора импульсов с помощью длинных (20 см) бифилярных шин, которые практически исключали возможность влияния массивных элементов генератора импульсов на процесс нагрева и охлаждения ДУИ.

ДУИ располагался на малогабаритном алюминиевом основании с размером $60 \times 40 \times 10$ мм³. Для измерения температуры использовалась термопара T , согласованная с цифровым индикатором. Термопара была вмонтирована в центральную область основания, она соединялась с индикатором проводами, расположенными в узком пазу, проделанном в верхней плоскости основания.

Изменение температуры ДУИ осуществлялось с помощью элемента Пельтье ТВ-2-(199-199)-0.8. Рабочая сторона элемента прижималась к основанию. К противоположной стороне был прижат охладитель, через который пропускалась водопроводная вода. Для нагрева ДУИ использовалась одна сторона элемента Пельтье, для охлаждения элемент Пельтье переворачивался. Питание элемента Пельтье осуществлялось постоянным током (до 10 А), который формировался источником тока.

Исследование ДУИ проводилось в диапазоне температур от -30 до $+90$ °С при двух значениях тока управления (350 и 250 А). Измерение тока через ДУИ осуществлялось малогабаритным датчиком тока (ДТ), который был выполнен в виде пояса Роговского и калиброван с помощью датчика тока Pearson current monitor 410. Измерение напряжения на ДУИ проводилось щупом (Tektronix P5100A). Для устранения влияния температуры на щуп он подключался к ДУИ только на момент измерения напряжения.

Результаты исследований ДУИ при токе управления $I_y=350$ А и различных температурах структуры ДУИ иллюстрирует рис. 2.

Рис. 2. Осциллограммы напряжения на ДУИ (U), тока через ДУИ (I) и кривые мощности потерь (P), полученные при токе управления 350 А.

На рис. 3 показаны аналогичные кривые, соответствующие току управления $I_y=250$ А и различным температурам структуры ДУИ.

Рис. 3. Осциллограммы напряжения на ДУИ (U), тока через ДУИ (I) и кривые мощности потерь (P), полученные при токе управления 250 А.

На рис. 4 приведены графики зависимости потерь энергии в ДУИ от температуры при разных значениях тока управления.

Рис. 4. Графики зависимости потерь энергии в ДУИ от температуры при токах управления 350 А (кривая 1) и 250 А (кривая 2)

Малые коммутационные потери энергии позволили получить очень малый нагрев ДУИ113-10 (не более 15 °С) при частотной коммутации импульсов тока I_F с амплитудой 1.3 кА (рис. 5) в естественных условиях, когда от ДУИ были отключены элемент Пельтье и охладитель.

Рис.5. Осциллограмма тока I_F , коммутируемого ДУИ при частотных испытаниях.

На рис. 6 показаны полученные при частотных испытаниях ДУИ113-10 зависимости температуры их структур от длительности процесса коммутации импульсов тока I_F .

Рис.6. Зависимость температуры структуры ДУИ от длительности частотных испытаний.

3. ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показывают, что при коммутации мощных быстро нарастающих импульсов тока ДУИ имеют очень малые коммутационные потери энергии в широком диапазоне изменений температуры их структур. Полученные результаты определяют большие перспективы для использования ДУИ в мощных устройствах современной электрофизики.

Технологические возможности ПАО “Электровыпрямитель” позволяют более чем в 2 раза увеличить диаметр структур ДУИ, что определяет возможность существенного повышения их коммутационных возможностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Efanov V. M., Kardo-Sysoev A. F., Tchashnikov I. G., and Yarin P. M.* Proceed. 1996 Int. Power Modulator Symposium. 1996. Boca Raton, Fl, USA. P. 22.
<https://doi.org/10.1109/MODSYM.1996.564440>
2. *Аристов Ю.В., Воронков В.Б., Грехов И.В., Козлов А.К., Коротков С.В., Люблинский А.Г.* ПТЭ. 2007. №2. С. 87. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9495287>
3. *Gusev A. I., Lyubutin S. K., Rukin S. N., and Tsyranov S. N.* IEEE Trans. Plasma Sci. 2016, V. 44. № 10. P. 1888. <https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2542343>
4. *Korotkov S. V., Aristov Yu. V., Korotkov D. A., and Zhmodikov A. L.* Rev. Sci. Instrum. 2020. V. 91. № 8. P. 084704. <https://doi.org/10.1063/5.0015284>
5. *Grekhov I., Efanov V., Kardo-Sysoev A., and Shenderoy S.* Solid-State Electron. 1985. V. 28. № 6. P. 597. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(85\)90130-3](https://doi.org/10.1016/0038-1101(85)90130-3)

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Функциональная схема стенда для температурных исследований ДУИ. D_1 : HER 608 (2 параллельные ветви по 3 диода с последовательным соединением). D_2 : HER 608 (3 диода с последовательным соединением). ДДРВ: 6 диодных структур с диаметром 20 мм; $C_0=130$ нФ; $R_0=1$ Ом.
- Рис. 2.** Осциллограммы напряжения на ДУИ (U), тока через ДУИ (I) и кривые мощности потерь (P), полученные при токе управления 350 А и различных температурах структуры ДУИ: **а, б, в, г** соответствуют температурам $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Рис. 3.** Осциллограммы напряжения на ДУИ (U), тока через ДУИ (I) и кривые мощности потерь (P), полученные при токе управления 250 А и различных температурах структуры ДУИ: **а, б, в, г** соответствуют температурам $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Рис. 4.** Графики зависимости потерь энергии в ДУИ от температуры при токах управления 350 А (кривая 1) и 250 А (кривая 2).
- Рис.5.** Осциллограмма тока I_F , коммутируемого ДУИ при частотных испытаниях.
- Рис.6.** Зависимость температуры структуры ДУИ от длительности частотных испытаний. Кривые 1, 2 получены при частоте следования импульсов тока I_F соответственно 100 и 200 Гц.

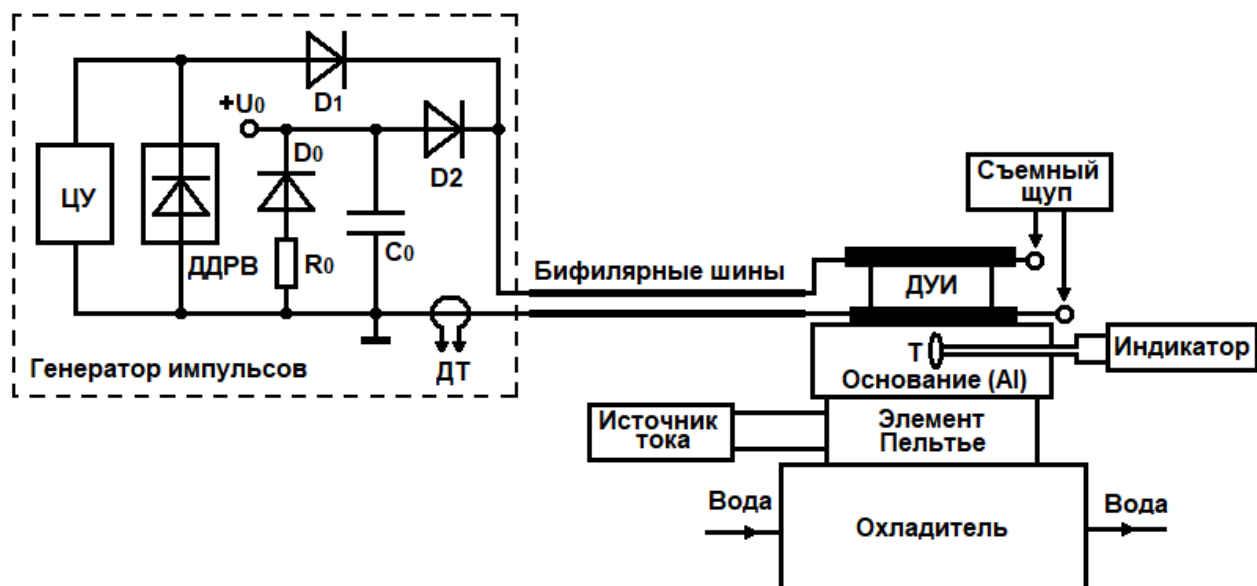


Рис.1.

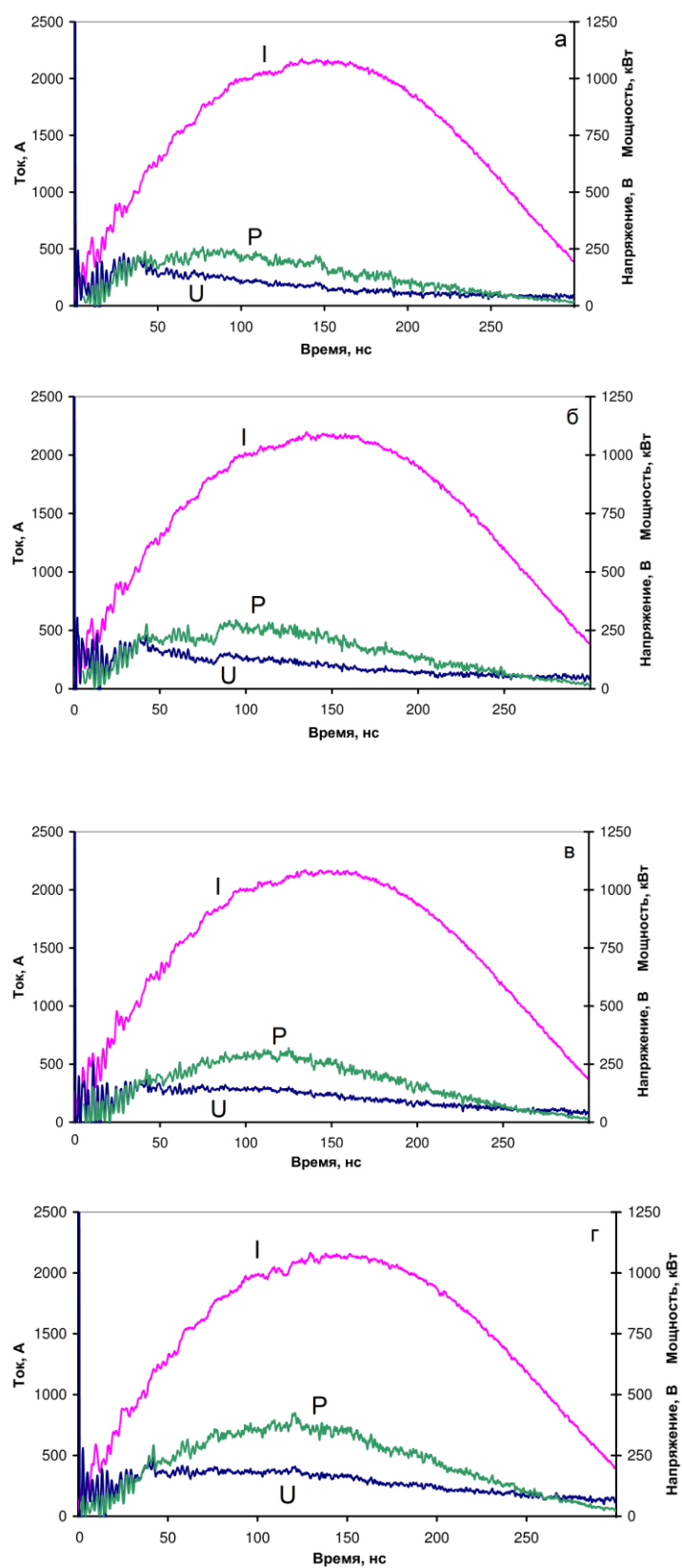


Рис. 2.

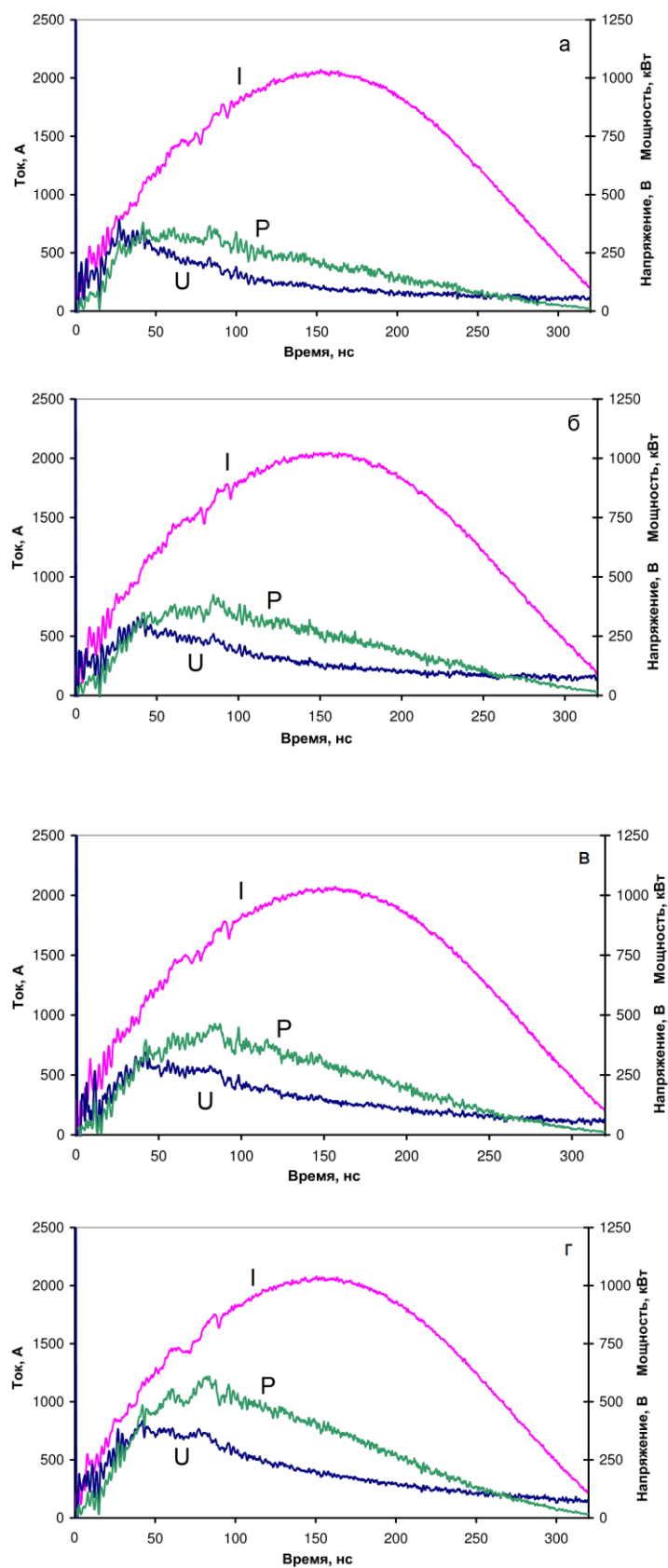


Рис.3.

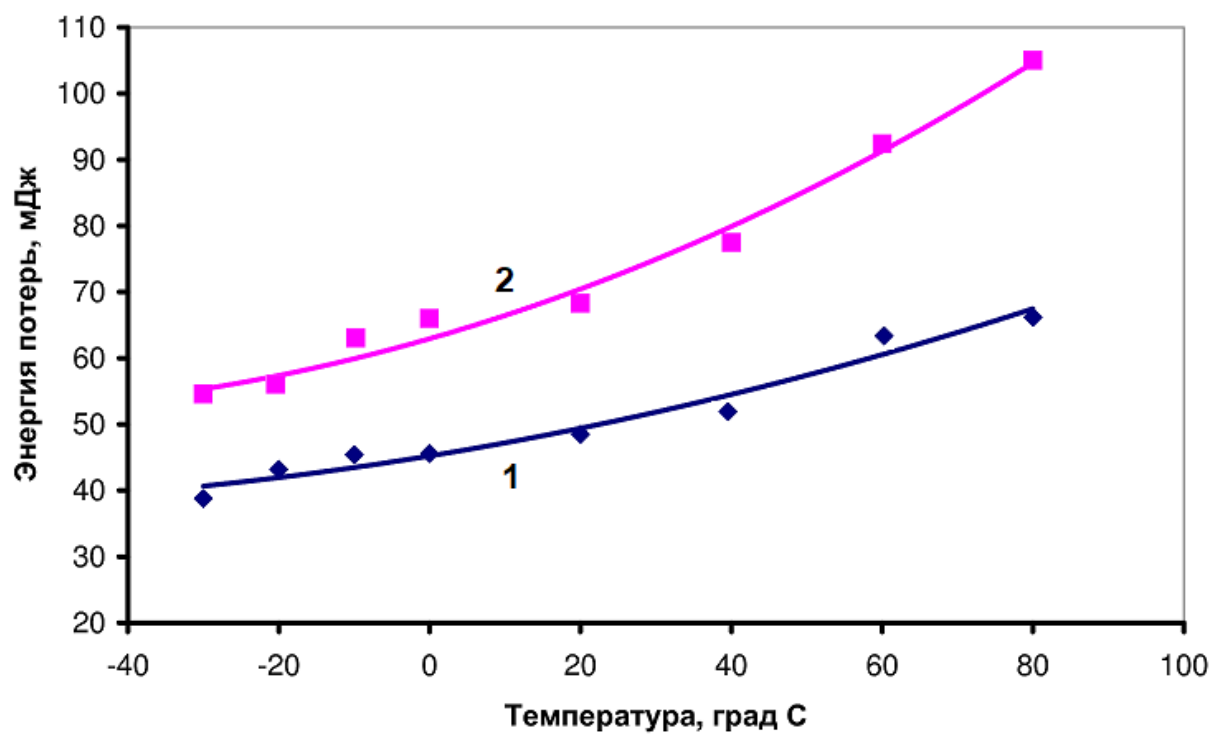


Рис.4.

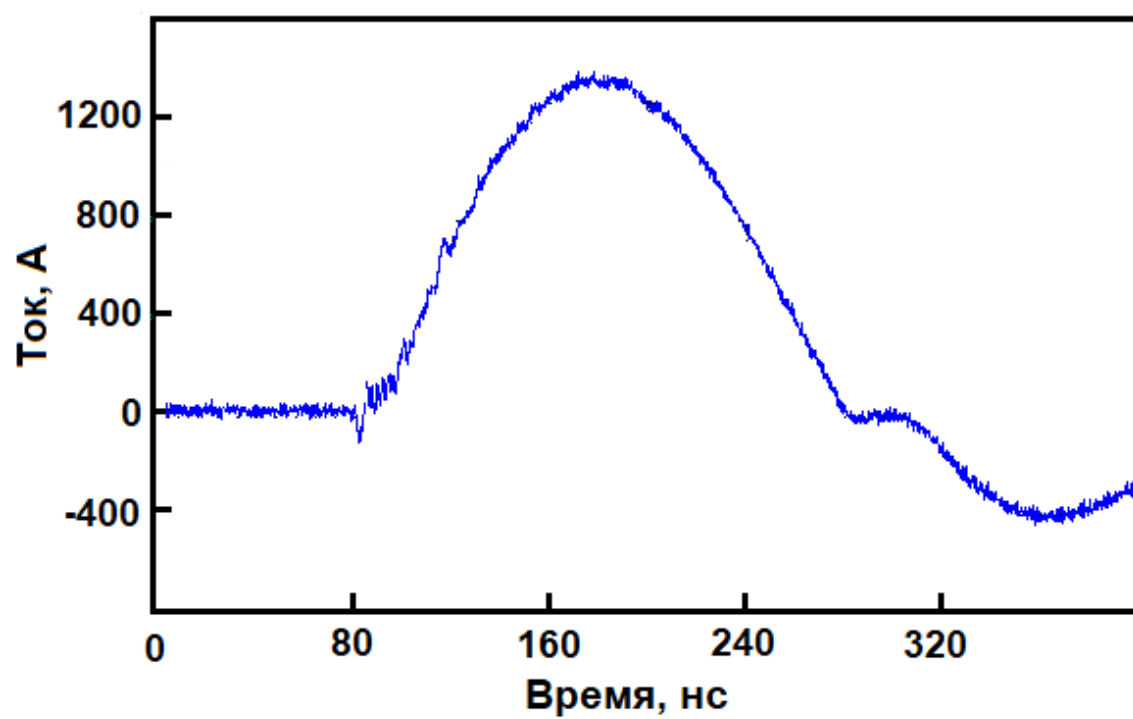


Рис.5.

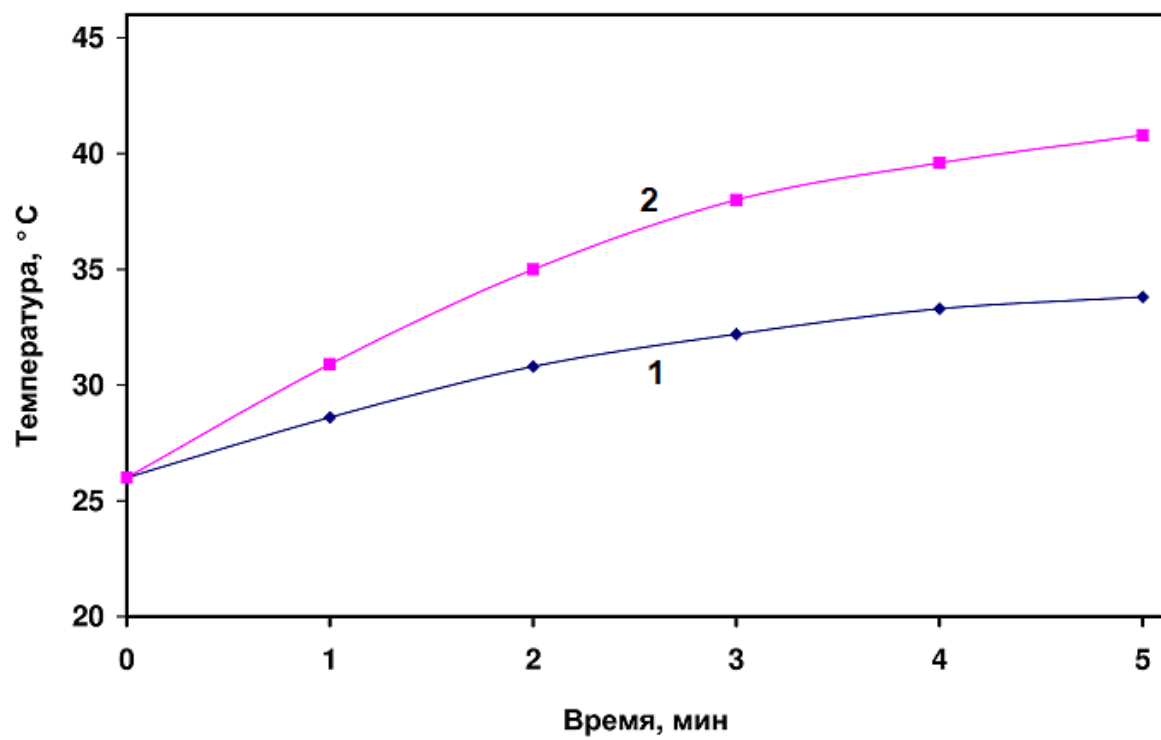


Рис.6.