

**ЭЛЕКТРОНИКА  
И РАДИОТЕХНИКА**

УДК 621.314.54:621.319.53

**ЛЕСТНИЧНЫЙ ГЕНЕРАТОР ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ  
ЛГВИ-100/50**

**©2026 г. С. И. Гусев<sup>а\*</sup>, А. Б. Ермаков<sup>а</sup>, П. Ю. Крашенинин<sup>а</sup>,  
В. П. Макаров<sup>а</sup>, Г. М. Мустафа<sup>а</sup>, С. В. Чистилин<sup>а</sup>, Э. А. Шарипов<sup>а</sup>,  
А. А. Ананичев<sup>б</sup>, А. П. Фокин<sup>б</sup>, М. Ю. Глявин<sup>б</sup>**

<sup>а</sup> ООО “НПП ЛМ Инвертор”

*Россия, 111250, Москва, Красноказарменная, 12, стр. 5*

<sup>б</sup> *Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова*

*Российской академии наук*

*Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.*

*\*e-mail: gusev-si@lm-inverter.ru*

Поступила в редакцию 20.06.2025 г.

После доработки 24.10.2025 г.

Принята к публикации 29.11. 2025 г.

Для проведения испытаний прототипов мощных СВЧ-приборов – гиротронов мегаваттного класса, создаваемых в Институте прикладной физики РАН, в ООО “НПП ЛМ Инвертор” был разработан и изготовлен генератор высоковольтных прямоугольных импульсов на напряжение 100 кВ и ток 50 А. Генератор был введен в работу в составе стенда для испытаний мощных гиротронов. В ходе испытаний подтверждены его параметры, обеспеченные новыми схемно-конструктивными решениями, реализованными при создании генератора. Применение методики ступенчатого (лестничного) формирования высоковольтных импульсов как в алгоритме управления высоковольтными преобразовательными ячейками, так и для построения изоляционной конструкции, позволило построить высокоэффективный генератор высоковольтных импульсов.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В Институте прикладной физики РАН (ИПФ РАН) в настоящее время ведутся работы по созданию мощных СВЧ-приборов – гиротронов мегаваттного класса, предназначенных для термоядерных исследований [1, 2]. Для формирования электронных потоков в них используются генераторы высоковольтных прямоугольных импульсов напряжения отрицательной полярности и различной длительности (от 10 мкс до непрерывного режима), при этом напряжения достигают 100 кВ, а токи – 50 А. Для проведения испытаний

прототипов мегаваттных гиротронов в ООО “НПП ЛМ Инвертор” был разработан и изготовлен лестничный генератор высоковольтных прямоугольных импульсов ЛГВИ-100/50, который формирует периодические импульсы прямоугольной формы в частотно-импульсном режиме со следующими параметрами:

- напряжение 100 кВ,
- ток 50 А,
- длительность импульсов от 10 до 100 мкс,
- частота следования импульсов до 0.1–10 Гц,
- фронты импульсов не более 5 мкс,
- нестабильность напряжения импульса 0.5%.

## 2. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ЛГВИ-100/50

Генератор выполнен на основе последовательного (ступенчатого) включения 48 преобразовательных ячеек с номинальным напряжением 2200 В, он осуществляет «лестничную» аппроксимацию фронтов импульса. Каждая ячейка представляет собой конвертор, выполненный по схеме удвоения напряжения с использованием транзисторов типа IGBT класса 1700 В. Питание ячеек осуществляется от специального высокочастотного трансформатора с воздушной изоляцией. Питание трансформатора осуществляется от конвертора частотой 11.9 кГц. Ячейки размещены на 6-этажном изоляционном стеллаже по 8 ячеек на этаже. Габаритные размеры генератора (ширина × глубина × высота) – 2.8×1.2×2.5 м<sup>3</sup>.

Структурная схема лестничного генератора высоковольтных прямоугольных импульсов (ЛГВИ) приведена на рис. 1.

**Рис. 1. Структурная схема ЛГВИ.**

Характерная особенность ЛГВИ, которая определяет структуру его построения, – это необходимость формирования импульсов высокого напряжения на мощном СВЧ-приборе (гиротроне или подобном ему электрическом устройстве) при его подключении через коаксиальный кабель длиной от 10 до 150 м. При приложении напряжения к началу кабеля в нем возбуждаются высокочастотные колебания, период которых при работе с замкнутым в начале и разомкнутым в конце кабелем определяется формулой [3]

$$T_{\text{каб}} = 4 t_1,$$

где  $t_1$  – время пробега волны по кабелю.

При длине кабеля, изменяющейся от 10 м до 150 м, время пробега волны меняется от 0.05 мкс до 0.75 мкс, а резонансная частота колебаний – от 5 МГц до 0.33 МГц, и без принятия дополнительных мер из-за колебаний на резонансной частоте соединительного

кабеля будет происходить искажение формы импульсов на СВЧ-приборе, начиная с искажения его переднего фронта. Для уменьшения высокочастотных искажений формирование импульсов высокого напряжения осуществляется путем последовательного включения 48 преобразовательных ячеек – транзисторно-конденсаторных модулей МТК1–МТК48 (IGBT MIFA-HB17FA-100N [4]) – в течение времени, равном длительности переднего фронта импульса, и аналогичного отключения ячеек на заднем фронте. Формирование ступени осуществляется путем одновременного включения верхнего транзистора модуля  $VT_1$  и нижнего транзистора модуля  $VT_2$ . Время включения транзисторов составляет около 45 нс. При формировании заднего фронта происходит последовательное отключение тех же транзисторов, при этом ячейки шунтируются обратными диодами двух других транзисторов модулей  $VT_1$  и  $VT_2$ . На каждой ступени напряжение источника нарастает/снижается только на небольшую величину – на напряжение одной ячейки. Таким образом создается лестничная аппроксимация плавно нарастающего/убывающего напряжения  $U(t)$  (рис. 2).

**Рис. 2.** Импульс со ступенчатым фактором (а), передний (б) и задний (в) фронты

Однако в высокочастотной колебательной системе лестничная аппроксимация не спасает от искажений. На рис. 3 приведены диаграммы выходного напряжения ЛГВИ, полученные при представлении кабеля длиной 50 м цепочечной схемой замещения  $x_1, \dots, x_{2n-1}$  (рис.4). Принятое в расчете число ячеек равно 120. На рис. 4 показано схематическое изображение конструктивной емкости ячеек  $C_e$  и сглаживающей индуктивности  $L_e$ .

**Рис. 3.** Колебания напряжения на гиротроне при питании через кабель длиной 50 м.

**Рис. 4.** Сервисный  $RL$ -демпфер. Вводится в расщелку между источником  $U(t)$  и началом соединительного кабеля.

Недопустимо большие колебания возбуждаются в напряжении нагрузки уже при скачке производной непрерывного напряжения  $U(t)$ . Инициированные небольшими скачками колебания еще больше. Даже при разнесении переключений ячеек необходимо дополнительное демпфирование. С этой целью в расщелку между “лестничным” источником  $U(t)$  и началом соединительного кабеля включен демпфер в виде двухполюсника из параллельно-соединенных ветвей  $R_s, L_s$  (рис. 4). Его параметры выбираются так, чтобы, с одной стороны, не допустить возбуждения высокочастотных колебаний на резонансной частоте соединительного кабеля, а с другой стороны, обеспечить плоскую вершину импульса с плавным подходом напряжения к вершине. Проведенное обследование показало, что для выполнения одновременно этих двух целей необходимо использование очень сильного  $RL$ -демпфера со следующими параметрами:  $L_s = 2$  мГн,  $R_s = 450–2700$  Ом.

При переходе к нагрузке с кабелем другой длины для выполнения требуемых целей достаточно подстройки только сопротивления  $R_s$ . Подстройка индуктивности дросселя демпфера не требуется.

При проведенном обследовании рассматривались различные сочетания параметров демпфера, которые также показывали удовлетворительные результаты. Так, на рис. 5, 6 показаны процессы в схеме с  $RL$ -демпфером при  $R_s = 140$  Ом,  $L_s = 887$  мкГн; длительности переднего и заднего фронтов, соответственно:  $h_p = 5$  мкс,  $h_m = 5$  мкс; длине соединительного кабеля  $l_k = 50$  м и проводимость нагрузки отображена степенной функцией

$$I_{\text{гир}} = \frac{1}{\sqrt{60}} \cdot U^{3/2}.$$

На рис. 5 приведены форма импульса напряжения на нагрузке при этих параметрах и формы токов в источнике и нагрузке. Колебания напряжения на нагрузке ( $U_{\text{гир}}$ ) отсутствуют. Они повторяют импульс источника  $U_0(t)$  с некоторой задержкой. Вершины импульсов  $U_0$ , совпадают. Выход напряжения  $U_{\text{гир}}$  к вершине апериодический, без перерегулирования. Ток  $I_0(t)$  источника имеет выбросы на фронтах. Это, по существу, токи перезаряда емкости кабеля, которая имеет заметную величину (7.5 нФ).

**Рис. 5.** Процессы в системе с  $RL$ -демпфером при длине кабеля 50 м: **а** – форма импульса напряжения источника ( $U_0$ ) и нагрузки ( $U_{\text{гир}}$ ); **б**) форма импульса тока источника ( $I_0$ ) и нагрузки ( $I_{\text{гир}}$ ).

На рис. 6 детально показан передний фронт импульса напряжения на гиротроне. Подход к вершине апериодический; перерегулирование 54 В, т.е. меньше 0.1%. Измеренное на уровне 0.95 амплитуды напряжения время переднего фронта  $U_{\text{гир}}(t)$  дает

$$h_p \approx 10.8 \text{ мкс.}$$

Вносимая  $RL$ -демпфером дополнительная задержка времени незначительна (около 0.8 мкс).

**Рис. 6.** Работа в системе с  $RL$ -демпфером. Передний фронт

Для исключения влияния емкостных токов, возникающих при скачках потенциала ячеек, на процессы в ячейках ЛГВИ каждая ячейка заключена в экранированный корпус, выполненный из алюминиевого листа толщиной 1–2 мм, все элементы схемы имеют надежное электрическое соединение в одной точке, соединенной с корпусом, это превращает его в единый эквипотенциальный элемент конструкции, корпуса ячеек имеют скругленные кромки по всему периметру.

Конструкционные емкости ячеек, соединительных проводов и обмоток трансформаторов образуют сетку с нарушениями регулярности на границах рядов ячеек, на выходе генератора и т.д. Для того чтобы обеспечить равномерное распределение напряжения по ячейкам в ЛГВИ, предусмотрен РС-делитель напряжения (ДН), элементы которого распределены по ячейкам (рис. 1). Емкости делителя много больше конструкционных

емкостей, главные из которых – емкости корпусов ячеек. Суммарная емкость делителя напряжения и его сопротивление

$$C_{\text{дн}} = 1.5 \text{ нФ}, R_{\text{дн}} = 300 \text{ Ом}.$$

При этом на каждую ячейку приходится емкость

$$C_{\text{дн1}} = 0.144 \text{ мкФ}.$$

Такой сверхмощный делитель загружает вентили ячеек импульсными токами на фронтах импульса напряжения. Расчетная величина пика тока вентиля на фронте может достигать 250 А, однако пик этот кратковременный (длительностью меньше одной микросекунды), и для современных IGBT, обладающих способностью выдерживать токи короткого замыкания длительностью до 10 мкс, он проблем не создает. С целью дополнительного сглаживания фронтов ступеней переключений транзисторов в лестничной схеме в каждой ячейке перед звеном ДН устанавливаются небольшие дроссели индуктивностью  $L_e = 1.8 \text{ мкГн}$  (рис. 4).

### 3. ИСПЫТАНИЯ

Были проведены испытания ЛГВИ на предприятии-изготовителе. Схема испытаний приведена на рис. 7. В качестве нагрузки использовалась цепочка резисторов  $C_5$ – $C_{40}$  суммарным сопротивлением 1 кОм. Для исключения возможных паразитных колебаний при измерении напряжения из-за недостаточно эффективного контура заземления лаборатории в цепь присоединения ЛГВИ к земле введена демпфирующая  $LC$ -цепочка. На рис. 8 приведены осциллограммы напряжений на входе демпфера ( $U_0$ ), нагрузке ( $U_n$ ) и тока нагрузки ( $I_n$ ). На рис. 9 приведены осциллограммы тех же величин при пробое в нагрузке.

**Рис. 7.**Схема испытаний ЛГВИ.

**Рис. 8.** Осциллограммы напряжений на входе демпфера ( $U_0$ ), нагрузке ( $U_n$ ) и тока нагрузки ( $I_n$ )

**Рис. 9.**Осциллограммы напряжений на входе демпфера ( $U_0$ ), нагрузке ( $U_n$ ) и тока нагрузки ( $I_n$ ) при пробое в нагрузке

Заводские испытания ЛГВИ, в том числе испытания на устойчивость ЛГВИ к режиму короткого замыкания в нагрузке, прошли успешно. Амплитудная величина тока при коротком замыкании в нагрузке не превысила 400 А.

Существенной особенностью конструкции лестничного генератора высоковольтных импульсов является его изоляционная структура, обеспечивающая возможность формирования импульсов напряжения амплитудой 100 кВ с использованием сухого многообмоточного трансформатора с воздушной изоляцией и каскада соединенных последовательно преобразовательных ячеек, размещенных на изоляционном стеллаже,

изготовленном из стеклотекстолита марки СТЭФ. 48 выходных обмоток трансформатора питают, соответственно, 48 преобразовательных ячеек, каждая из которых выполнена по схеме удвоения напряжения. Напряжение одной ячейки составляет 2.1 кВ, что дает выходное напряжение ЛГВИ, равное 100 кВ. Высоковольтная изоляция ЛГВИ обеспечивается за счет равномерной укладки высоковольтных проводов от 48 обмоток трансформатора таким образом, что напряжения формирующихся импульсов высокого напряжения равномерно распределяются ступенями от нулевого до максимального значения как между проводами, так и между выходными обмотками трансформатора, что исключает возможность возникновения коронных разрядов на отдельных проводниках. Ячейки располагаются на 6 этажах изоляционного стеллажа, по 8 ячеек на этаже. Соответственно, по 8 пар высоковольтных проводов с равномерным нарастанием напряжения между парами уложенных высоковольтных проводов, объединенных в специальный плоский жгут, питают 8 ячеек, расположенных на одном этаже, и далее серпантинном аналогичными жгутами осуществляется питание ячеек, расположенных на каждом из 6 этажей. Напряжение между соседними парами проводов равно 2.1 кВ, а на один жгут приходится 14.5 кВ.

На рис. 10 приведена фотография ЛГВИ при испытаниях в ООО “НПП ЛМ Инвертор”, а на рис. 11 – фотография высоковольтного высокочастотного трансформатора. Трансформатор имеет стержневую магнитную систему. Конфигурация магнитопровода необходимого размера получена склейкой из унифицированных ферритовых шлифованных пластин. Секции высоковольтной обмотки трансформатора выполнены в один слой. При высоте окна трансформатора, равной 590 мм, высота всей обмотки высокого напряжения (ВН) составляет 440 мм, тем самым мы создали необходимый изоляционный промежуток до верхнего ярма. Над обмоткой ВН трансформатора, находящейся под потенциалом 100 кВ, располагается тороидальный экран с большим радиусом закругления для исключения возможности возникновения коронного разряда. Дополнительную электрическую прочность промежутка между обмоткой ВН и ярмом обеспечивает диэлектрический барьер, устанавливаемый в этом промежутке. Импульсная электрическая прочность между низковольтной и высоковольтной обмотками трансформатора обеспечивается чисто воздушным промежутком величиной 70 мм. Изоляция высоковольтной обмотки, выполненная с помощью изоляционных стеклослюдинитовых лент, предварительно пропитанных эпоксидным компаундом, образует монолитную структуру после запечки в термостате.

**Рис. 10.** Фотография ЛГВИ при испытаниях на предприятии-изготовителе.

**Рис. 11.** Высоковольтный высокочастотный трансформатор.

На рис. 12а приведена фотография шкафа управления, включающего в себя преобразователь с выходной частотой 11.9 кГц, обеспечивающий питание высоковольтного трансформатора, а на рис. 12б – увеличенное изображение табло, отображающего напряжение каждой преобразовательной ячейки ЛГВИ, задаваемое с панели управления.

**Рис. 12.** Фотография шкафа управления (а) и табло (б), отображающего состояние ячеек ЛГВИ.

После заводских испытаний ЛГВИ был поставлен заказчику – ИПФ РАН – и введен в работу. На рис. 13 приведены осциллограммы напряжения и тока нагрузки ЛГВИ при работе на гиротроне на испытательном стенде ИПФ РАН.

**Рис. 13.** Осциллограммы напряжения и тока нагрузки ЛГВИ при работе на испытательном стенде ИПФ РАН (масштабы напряжения и тока:  $m_U=25$  кВ/дел,  $m_I=15$  А/дел).

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лестничный генератор высоковольтных прямоугольных импульсов был введен в работу в ИПФ РАН в составе стенда для испытаний мощных гиротронов. В ходе испытаний подтверждены его параметры, обеспеченные новыми схемно-конструктивными решениями, реализованными при создании ЛГВИ. Применение методики ступенчатого формирования высоковольтных импульсов как в алгоритме управления высоковольтными преобразовательными ячейками, так и для построения изоляционной конструкции ЛГВИ, позволило построить высокоэффективный генератор высоковольтных импульсов.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работы по созданию высоковольтного источника питания гиротронного комплекса частично выполнены в рамках проекта ИПФ РАН “Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР-диапазона” (FFUF-2022-0007, шифр “Вакуум”), выполняемого в рамках государственного задания № 075-00294-25-03 с дополнительным соглашением с Минобрнауки России № 075-03-2025-046/3, являющегося частью национального проекта “Новые атомные и энергетические технологии”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Litvak A.G., Denisov G.G., Glyavin M.Y.* // IEEE J. Microwaves. 2021. V. 1. №. 1. P. 260. <https://doi.org/10.1109/JMW.2020.3030917>

2. *Thumm M., Denisov G., Sakamoto K., Tran M.* // Nucl. Fusion. 2019. V. 59. P. 073001.  
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab2005>
3. *Жуховицкий Б.Я., Негневицкий И.Б.* Теоретические основы электротехники, т.2. / М.-Л.: Энергия, 1965.
4. <https://proton-electrotex.com/>.



## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Структурная схема ЛГВИ.
- Рис. 2.** Импульс со ступенчатым фактором (**а**), передний (**б**) и задний (**в**) фронты укрупненно.
- Рис. 3.** Колебания напряжения на гиротроне при питании через кабель длиной 50 м.
- Рис. 4.** Сериесный  $RL$ -демпфер. Вводится в расщелку между источником  $u(t)$  и началом соединительного кабеля.
- Рис. 5.** Процессы в системе с  $RL$ -демпфером при длине кабеля 50 м: **а** – форма импульса напряжения источника ( $U_0$ ) и нагрузки ( $U_{\text{гир}}$ ); **б** – форма импульса тока источника ( $I_0$ ) и нагрузки ( $I_{\text{гир}}$ ).
- Рис. 6.** Работа в системе с  $RL$ -демпфером. Передний фронт.
- Рис. 7.** Схема испытаний ЛГВИ.
- Рис. 8.** Осциллограммы напряжений на входе демпфера ( $U_0$ ), нагрузке ( $U_{\text{н}}$ ) и тока нагрузки ( $I_{\text{н}}$ );  $m_U$  и  $m_I$  – масштабы соответственно напряжения и тока.
- Рис. 9.** Осциллограммы напряжений на входе демпфера ( $U_0$ ), нагрузке ( $U_{\text{н}}$ ) и тока ( $I_{\text{н}}$ ) при пробое в нагрузке;  $m_U$  и  $m_I$  – масштабы соответственно напряжения и тока.
- Рис. 10.** Фотография ЛГВИ при испытаниях на предприятии-изготовителе.
- Рис. 11.** Высоковольтный высокочастотный трансформатор.
- Рис. 12.** Фотография шкафа управления (**а**) и табло (**б**), отображающего состояние ячеек ЛГВИ.
- Рис. 13.** Осциллограммы напряжения и тока нагрузки ЛГВИ при работе на испытательном стенде ИПФ РАН: масштабы напряжения  $m_U=25$  кВ/дел и тока  $m_I=15$  А/дел.

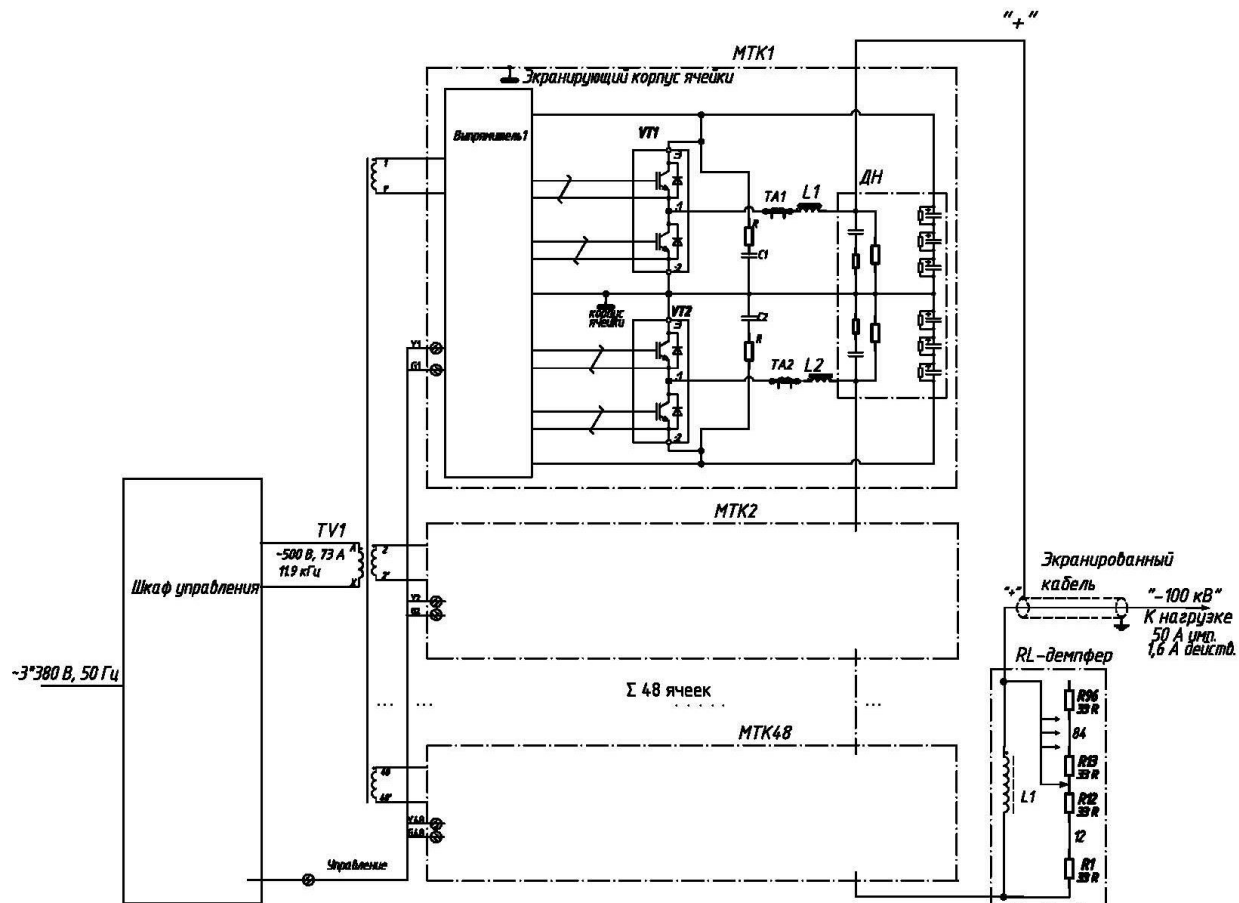


Рис. 1.

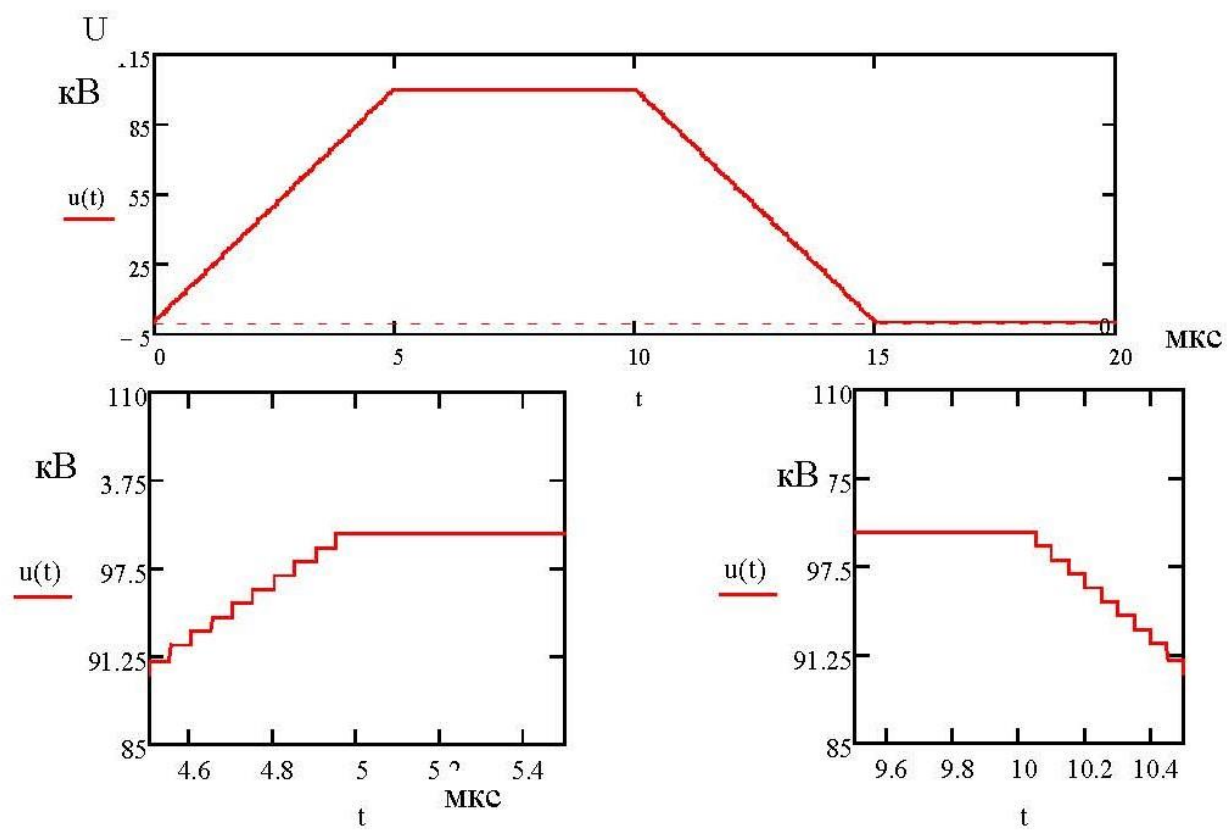


Рис. 2.

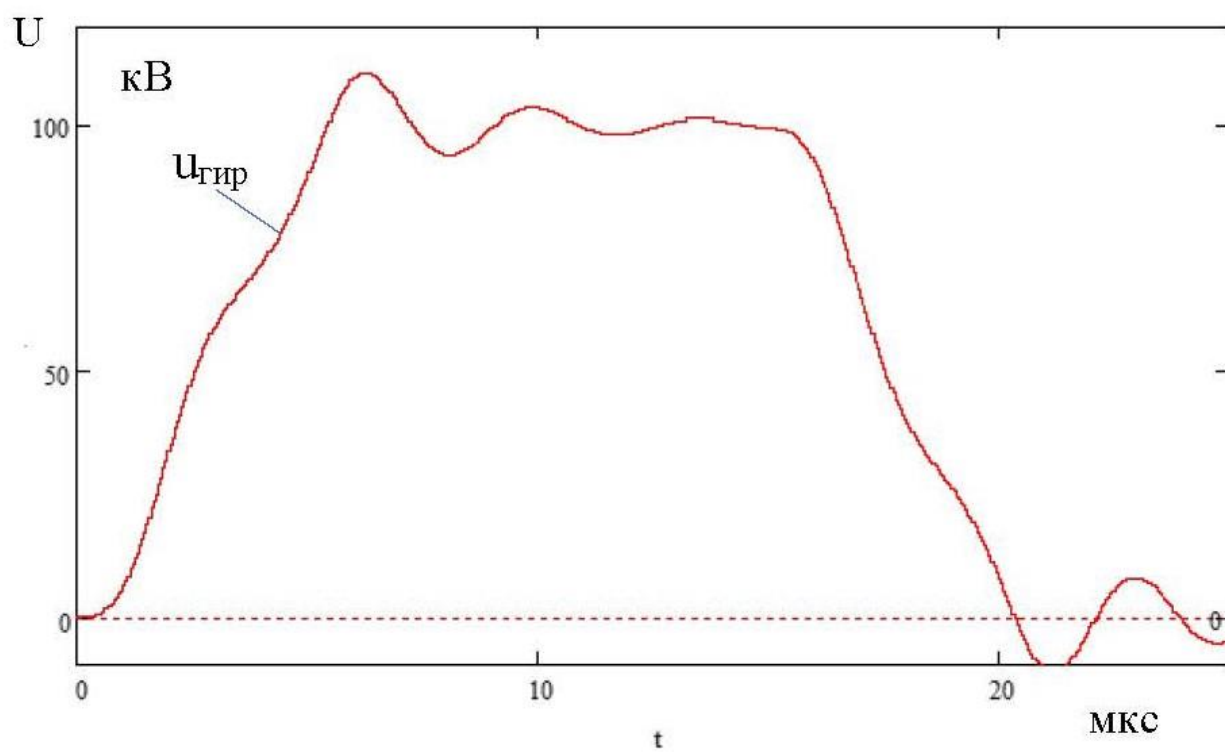


Рис. 3.

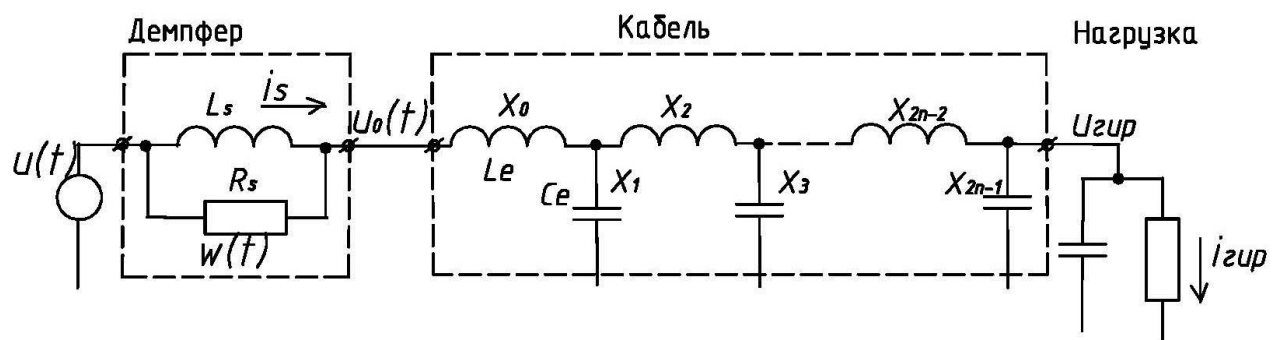


Рис. 4.

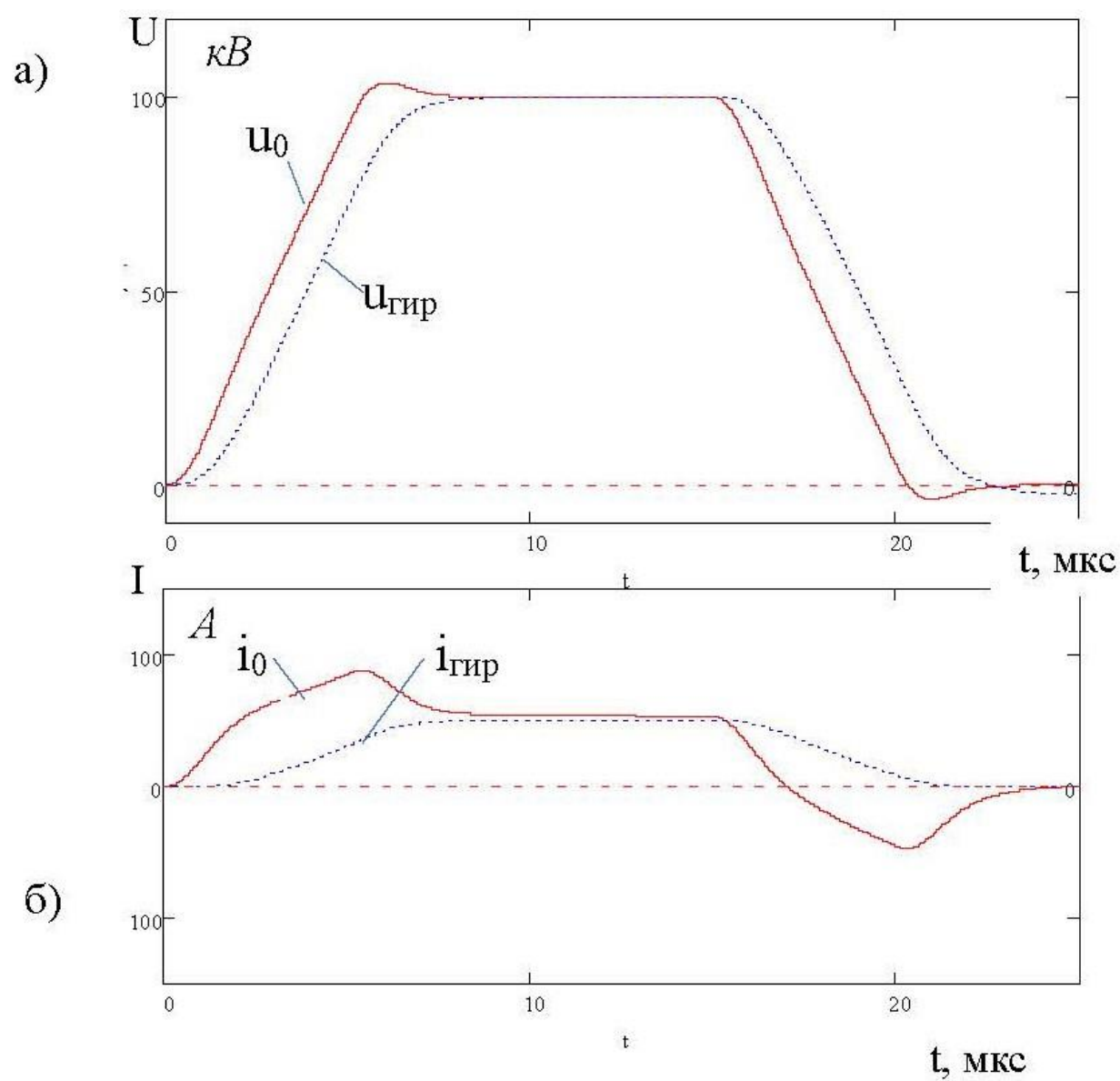


Рис. 5.

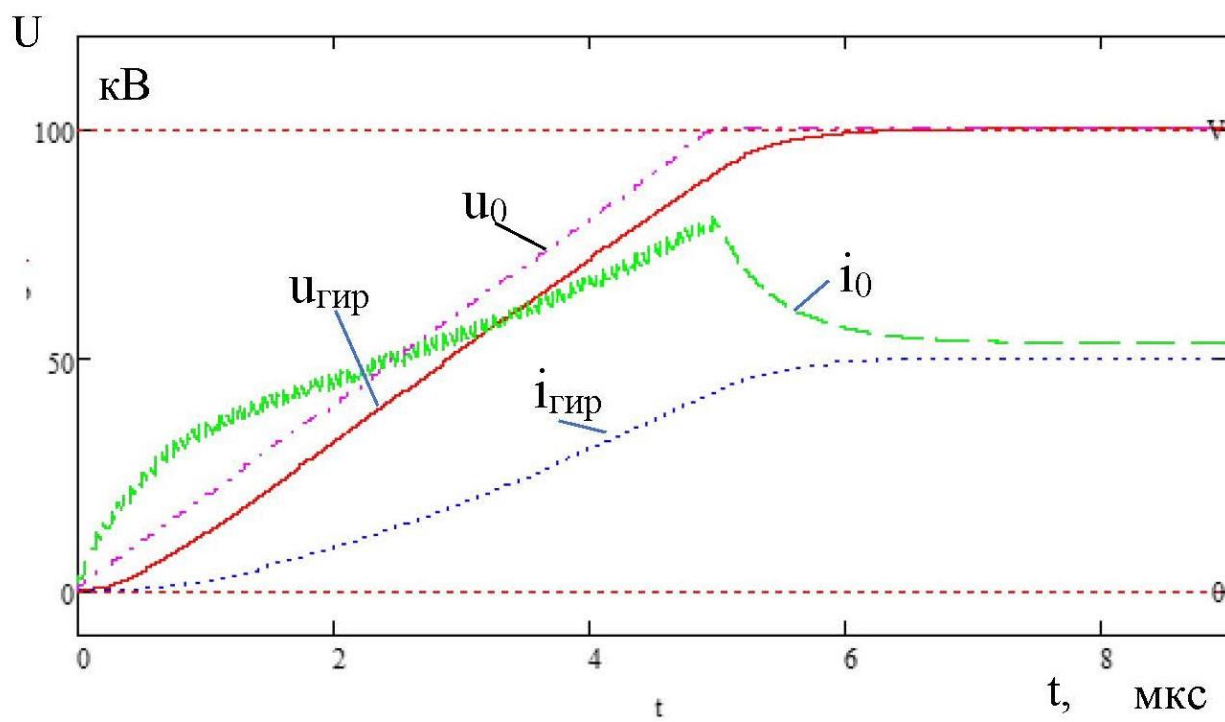


Рис. 6.

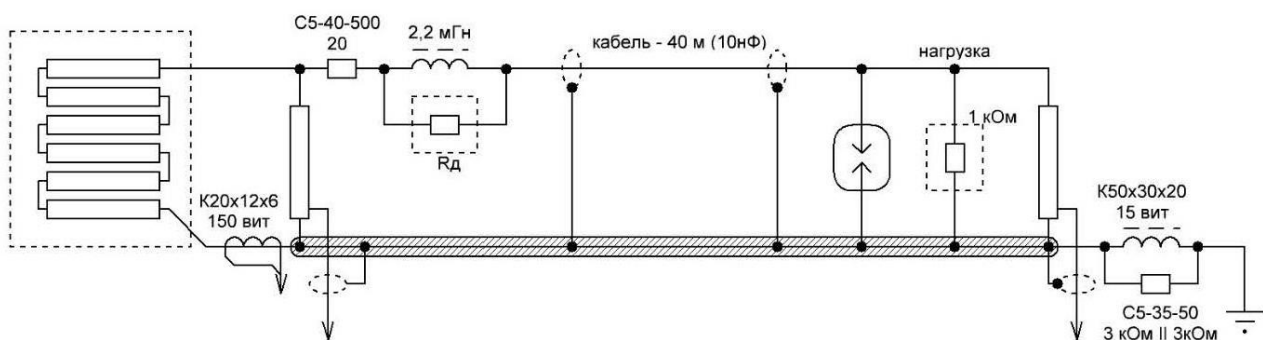


Рис. 7.



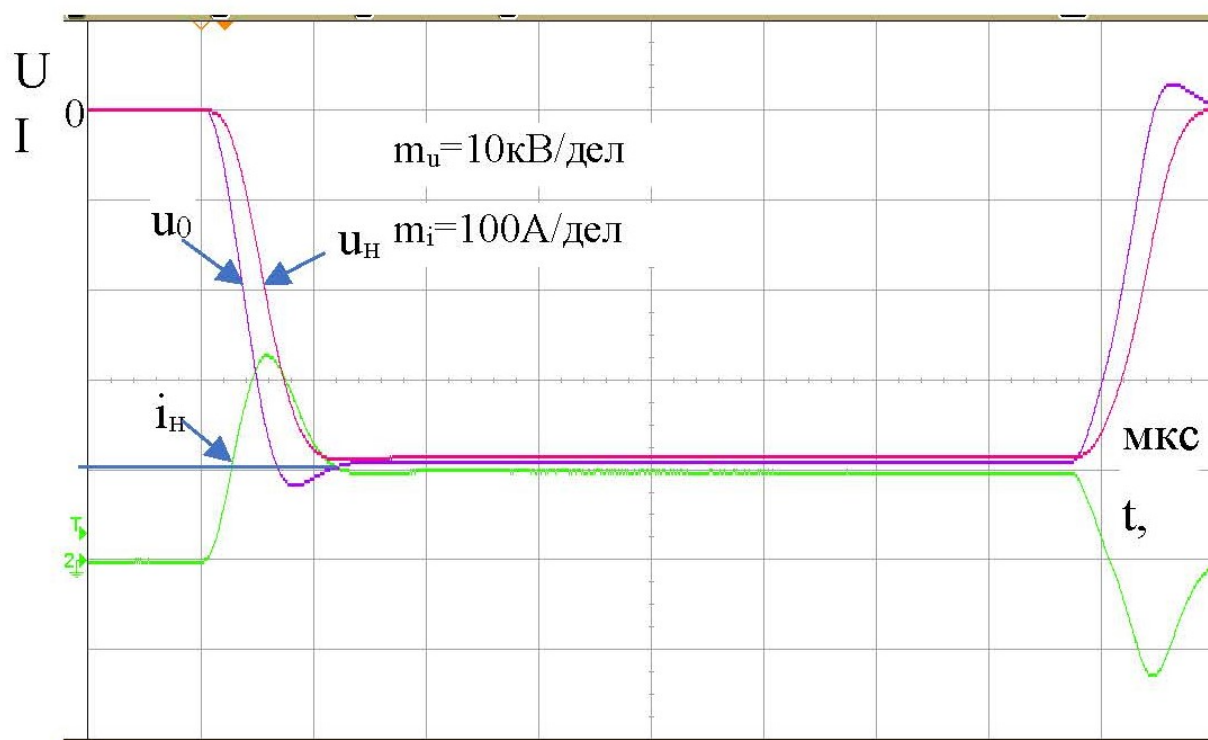


Рис. 8.

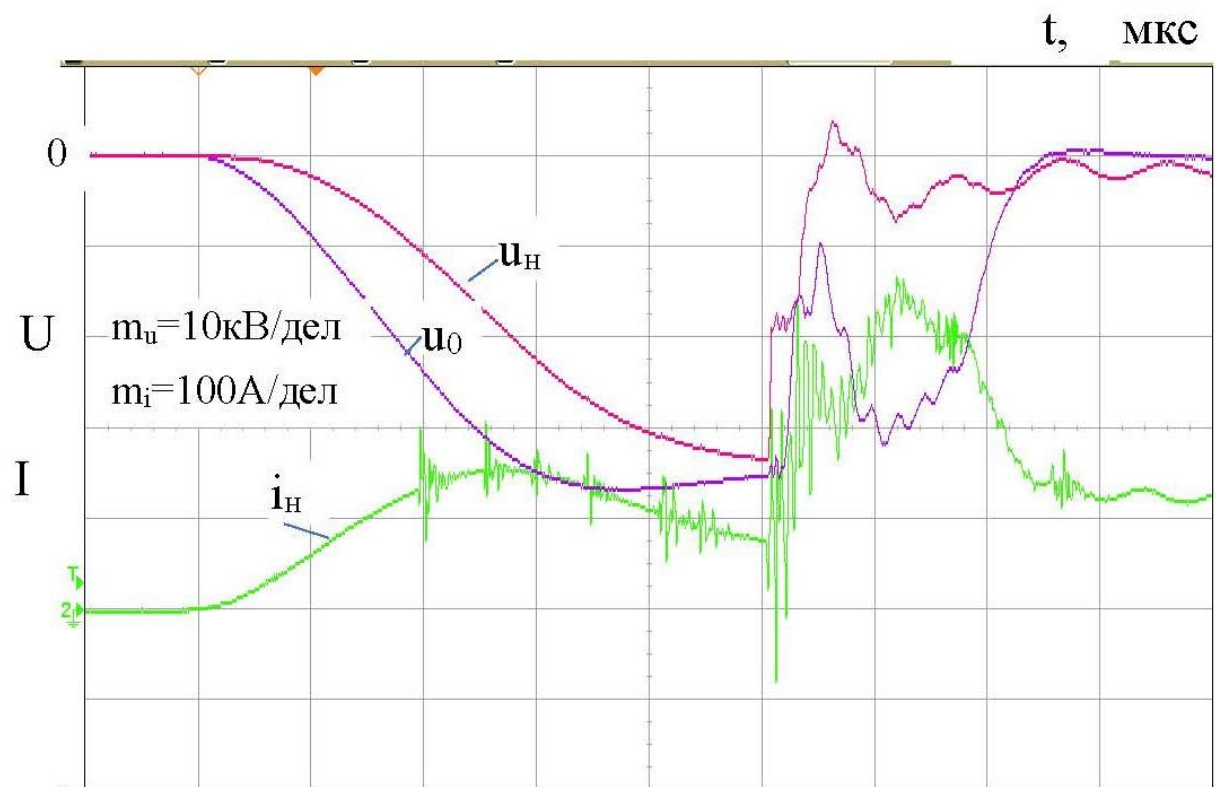


Рис. 9.



Рис. 10.



**Рис. 11.**



(a)



(б)

Рис. 12.

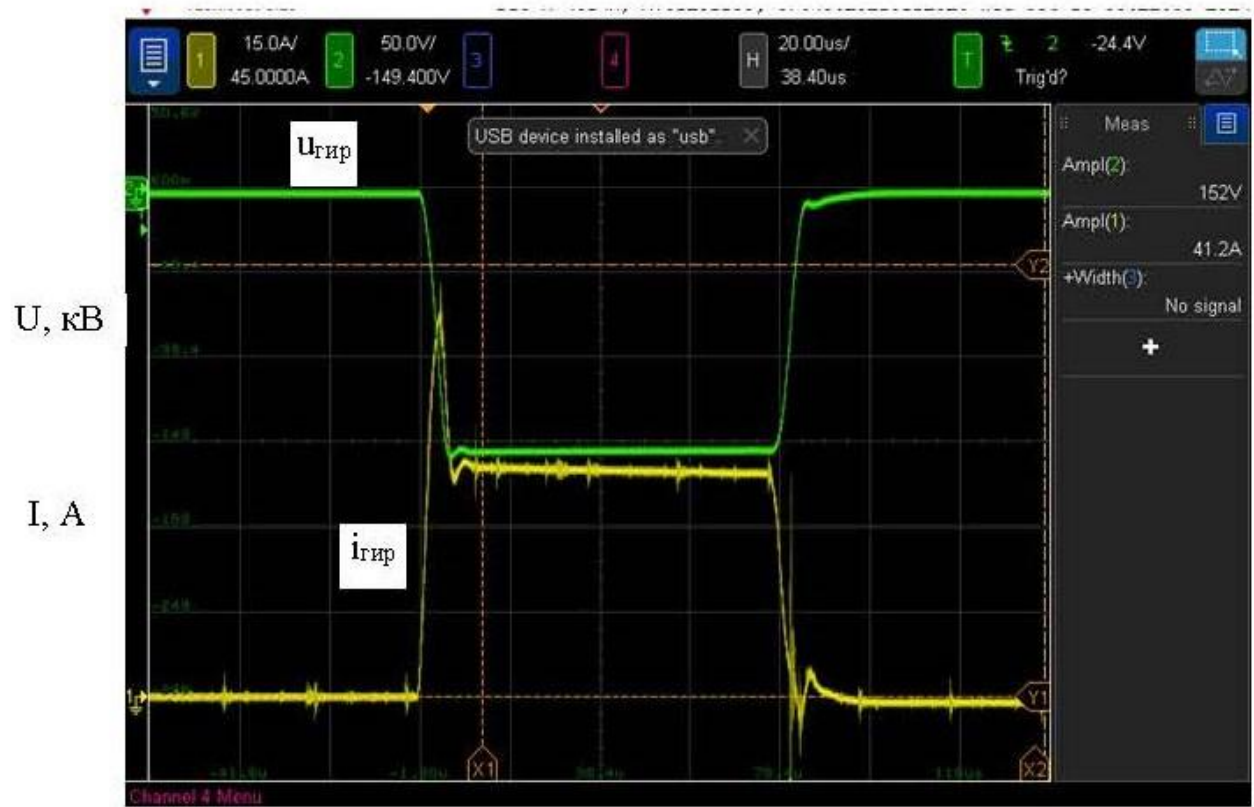


Рис. 13.