

ЭЛЕКТРОНИКА
И РАДИОТЕХНИКА

УДК 53.07

**ФОРМИРОВАТЕЛЬ КОЛЕБАНИЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЙ СВЕРХПРОВОДНИКОВ**

©2025 г. Е. П. КРАСНОПЕРОВ^{а,*}, Н. С. ЛЕВЧЕНКО^а, А. В. ПРУТКОВ^а

^аНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”

Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

**e-mail: krasnoperov_ep@nrcki.ru*

Поступила в редакцию 10.06.2025 г.

После доработки 13.08.2025 г.

Принята к публикации 22.08.2025 г.

Разработан источник питания, который формирует различные конфигурации колебаний переменного тока заданной длительности. Ток источника добавляет тепло в сверхпроводник малыми управляемыми порциями, что позволяет изучать динамические процессы на переменном токе с амплитудами I_a , превышающими средние критические значения I_c . Можно прогнозировать появление узкой нормальной зоны и определять условия устойчивой работы сверхпроводника при $I_a > I_c$. На сверхпроводящих лентах фирмы SuperOx с тонким медным покрытием наблюдался процесс развития тепловой неустойчивости вплоть до перегорания материала.

1. ВВЕДЕНИЕ

В связи с успехами в технологии высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в последние годы предпринимаются попытки их применения для линий электропередач, в токоограничителях, электродвигателях и других энергетических устройствах. В подобных устройствах важна устойчивая работа для амплитуд токов, близких и порой превышающих критический ток. В этом случае необходимо знать динамику сверхпроводника на переменном токе.

При измерении вольт-амперных характеристик (ВАХ) лент на основе ВТСП при вводе либо постоянного, либо переменного тока существует ряд проблем, которые затрудняют получение адекватных характеристик материала. Во-первых, распределение критической плотности тока по длине ВТСП неоднородно [1]. Во-вторых, значение индекса нарастания тока (n -value) в ВАХ относительно низкое, и толщина медного (стабилизирующего) покрытия невелика. Поэтому если возникает нормальная зона, то скорость ее

распространения крайне низка, она составляет порядка 10–100 см/с [2, 3]. В результате этого происходит локальный перегрев сверхпроводника, причем предсказать место появления нормальной зоны практически невозможно [4]. Повышение температуры в области возникновения нормальной зоны носит необратимый характер. Соответственно, велика вероятность локального пережога образца.

Изучение ВАХ при токах, заметно превышающих критические, традиционно осуществляют импульсным методом с длительностью импульсов, сравнимой с периодом колебаний напряжения в промышленной сети. В этом случае нагрев сверхпроводника оказывается небольшим, и ток может значительно превышать критический. Краткость воздействия легла в основу изучения динамики поведения ВАХ лент ВТСП при квазиимпульсном воздействии (затухающий ток) с амплитудой значительно выше I_c [4].

Цель данной работы состояла в создании устройства, которое способно формировать цуг переменного тока с заданной наперед конфигурацией и числом колебаний. Устройство предназначено для изучения динамики ВАХ сверхпроводников на переменном токе. Необходимость такого устройства продиктована тем, чтобы при измерениях не появлялась локальная нормальная зона, которая неизбежно приводит к порче сверхпроводника.

2. СХЕМА ФОРМИРОВАТЕЛЯ ТОКА

Электрическая схема устройства формирования тока изображена на рис. 1. Она содержит измерительную цепь с силовым трансформатором (Tr_1) и блок управления (БУ) с микроконтроллером Ардуино Нано. Вторичная обмотка трансформатора Tr_1 с внутренним сопротивлением менее 10 мОм создает напряжение до 32 В. В измерительной цепи последовательно соединены эталонное сопротивление $R_n=0.25$ мОм (75 мВ/300 А) для измерения тока, изучаемый образец ВТСП сопротивлением R_s , помещаемый в жидкий азот, сопротивление R_{var} для регулировки амплитуды тока и пара встречно-параллельно включенных тиристоров T_1 и T_2 таблеточного типа Т500, управляющая током. В данной конструкции со сверхпроводящим образцом можно создавать ток до 500 А. Длительность протекания тока ограничивается нагревом резистора R_{var} , она достигает десятка секунд. Измерение тока при записи ВАХ осуществляется поясом Роговского (ПР).

Рис. 1. Электрическая схема формирователя тока: силовой трансформатор (Tr_1)...

В блоке управления формируется прямоугольный управляющий импульс (цуг) заданной длительности, кратной продолжительности полупериодов сети ($T/2=10$ мс). Этот импульс открывает тиристоры T_1 и T_2 и, соответственно, включает ток в измерительной цепи с образцом. Выключение тока происходит автоматически на заднем фронте цуга, когда в тиристоре ток меняет направление. Блок управления собран на отдельной плате, где

размещены понижающий трансформатор (Tr_2), блок определения нуля напряжения (БОНН), блок определения знака напряжения (БОЗН), микроконтроллер (МК) марки ATmega328, оптопара с симисторным выходом (ОП) типа МОС3023, управляющий симистор (ТС) типа BT134-600, стабилизированный источник питания (AC/DC) напряжением +5 В для микроконтроллера и других устройств блока управления.

Импульс с микроконтроллера МК подается на оптопару ОП, которая служит “отвязкой” измерительной цепи от “земли”. Затем он поступает на симистор ТС и замыкает управляющие электроды тиристоров T_1 и T_2 .

Импульс, управляющий работой тиристоров, должен возникать в момент нулевого напряжения сети и учитывать его фазу, т.е. включение тока может начинаться с положительной или отрицательной полуволны напряжения. Задание времени переднего фронта управляющего импульса осуществляется следующим образом. Напряжение с понижающего трансформатора (Tr_2) в блоке БОНН выпрямляется диодным мостом. Вблизи нулевых значений напряжения триггер Шмидта с инвертором формирует короткие положительные импульсы, интервал между которыми равен полупериоду сетевого напряжения. Определение знака первого колебания выполняет блок БОЗН. В этом блоке диод пропускает только отрицательную полуволну напряжения. Затем триггер Шмидта с инвертором создает положительный импульс. Время переднего фронта и длительность этого импульса соответствуют отрицательной полуволне напряжения. Импульсы с блоков БОНН и БОЗН поступают в микроконтроллер МК, который программным образом формирует импульс, управляющий работой тиристоров.

Программа, управляющая работой устройства, написана в среде программирования Arduino IDE на версии языка C++ “Arduino C” для МК Ардуино Нано в составе БУ. Она обрабатывает импульсы с БОНН и БОЗН и формирует импульс, управляющий работой тиристоров. Кроме того, она осуществляет включение видео записи до начала пуска тока и синхронизацию кадров видеосъемки с включением и выключением тока.

Запуск программы измерений осуществляется кнопкой *Пуск*. Затем формируется импульс длительностью 5 мс, который через транзисторную оптопару подается в модуль BlueTooth и дистанционно включает на запись видеокамеру. Спустя 1 с после включения камеры формируется импульс, управляющий работой тиристоров T_1 и T_2 . Управляющий импульс имеют следующую структуру. По импульсу БОЗН выбирается включение с положительного или отрицательного полупериода тока, и по импульсу БОНН (передний фронт управляющего импульса) происходит включение тиристоров. Устанавливается длительность управляющего импульса, которая кратна полупериоду колебания напряжения сети $n \cdot T/2$. После этого ток выключается.

Последовательное выполнение этой программы позволяет генерировать в измерительной цепи различные варианты колебаний синусоидального тока с задаваемой временной задержкой между ними. Типичные реализации прерывания тока показаны ниже.

Управляющий импульс запускает регистрацию измерений и является индикатором длительности цуга колебаний тока. Кроме того, он служит в качестве синхронизирующего импульса для внешних устройств. На рис. 1 он подписан *Запуск ВУ*.

Одним из внешних устройств являлась видеокамера, которая служила для наблюдения за образцом. Камера размещалась над образцом на расстоянии 15 см. Она имела частоту съемки 120 кадров/с, что обеспечивало регистрацию состояния образца в течение каждого полупериода протекания тока. Для синхронизации кадров видеозаписи с колебаниями тока использовался светодиод, установленный в области видимости камеры. На переднем и заднем фронтах синхроимпульса светодиод включался на время порядка 10 мкс. Вспышки светодиода фиксировались видеокамерой, и соответствующие два кадра с изображениями светящегося диода оказывались привязанными к началу ввода тока и его прерыванию. Таким оптическим способом осуществлялась синхронизация видеокадров и колебаний тока.

Положительный и отрицательный полупериоды тока имеют различающиеся амплитуды из-за небольшой разницы характеристик тиристоров T_1 и T_2 . В нашем случае разница величин I_a не превышала 0.4%.

На рис. 2 приведены типичные фрагменты осциллограмм токов, реализуемых прерывателем. Это могут быть как однократные колебания, так и непрерывные – в виде цуга колебаний на интервале времени, задаваемом в программе.

Рис. 2. Некоторые варианты прерывания тока в измерительной цепи

3. ОПИСАНИЕ ОБРАЗЦОВ И ПРОЦЕДУРЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Возможности разработанного устройства были апробированы на измерениях критических свойств ленты высокотемпературного сверхпроводника фирмы “СуперОкс”. Лента имеет ширину 4 мм и толщину 0.05 мм. Ее основой служит подложка из Hastelloy толщиной 38 мкм с буферным слоем, на который нанесен сверхпроводящий слой из YBCO толщиной 2 мкм. Особенность ленты состоит в том, что ее стабилизирующие слои серебра и меди с обеих сторон имеют малую толщину (порядка 5 мкм).

Отрезок ленты длиной 150 мм припаивался к двум свободно висящим медным токоподводам. Продольная ось ленты была горизонтальной, а ее поверхность была параллельна вертикальной плоскости. Конструкция размещалась в емкости с жидким азотом. При такой вертикальной установке ленты в азоте ее стороны имеют одинаковые условия охлаждения. Длина припая лент к токоподводам составляла около 15 мм.

Потенциальные контакты припаивались к ленте, так что расстояние между контактами L равнялось 100 мм. Большая длина измерительного участка ленты связана с невысокой чувствительностью цифрового осциллографа (эта чувствительность на 2 порядка ниже, чем у вольтметров постоянного напряжения). Увеличение расстояния между контактами позволило приблизиться к критическим электрическим полям, принятым для измерений на постоянном токе.

Критические явления в ВТСП-лентах, особенно в тонких, часто возникают у мест припайки к токоподводам и остаются за пределами потенциальных контактов. Чтобы этого избежать, края лент до потенциальных контактов покрывались тонким слоем низкотемпературного припоя. В результате такой “защитной стабилизации” разрушение сверхпроводимости вплоть до перегорания происходило на контролируемом участке между потенциальными контактами.

Измерения в эксперименте осуществлялись с помощью цифрового осциллографа АКИП–4131/1А. На его первый канал подавался сигнал синхроимпульса, и по его переднему фронту осуществлялись включение тока и пуск измерений. Второй канал регистрировал напряжение на образце ($U_s^*(t)$).

Неизолированные каналы осциллографа искажают одновременное измерение напряжений на последовательно включенных сопротивлениях R_n и R_s в измерительной цепи. По этой причине ток в цепи регистрировался поясом Роговского, который предварительно калибровался по напряжению на эталонном сопротивлении R_n . Напряжение с пояса Роговского (U_{Rog}) подавалось на третий канал осциллографа. Последнее после интегрирования представляло собой осциллограмму тока.

Процедура измерений состояла в последовательном увеличении числа полупериодов колебаний тока и регистрации напряжения на образце. Серьезным недостатком измерений на переменном токе является индуктивная наводка, которая возникает от магнитного поля, создаваемого током. Чтобы отделить помеху от полезного сигнала, мы применяли два метода. В первом измерялось напряжение на образце ($U_{s0}(t)$) при амплитуде тока ниже критического ($I_{a0} < I_c$), когда сигнал от сверхпроводника заведомо равен нулю. Поскольку сигнал помехи пропорционален току, вычитая его из измеренного напряжения U_s^* , мы определяли собственно сигнал от сверхпроводника:

$$U_s(t) = U_s^*(t) - U_{s0}(t) \cdot I_a / I_{a0}.$$

Во втором методе из $U_s^*(t)$ вычитался масштабированный (уменьшенный в 9 раз) сигнал с пояса Роговского, который пропорционален индуктивной наводке.

В момент возникновения напряжения $U_s(t) > 0$ из осциллограммы тока легко оценить величину критического тока. Используя две полусинусоиды с задержкой по времени, можно видеть, как меняется критический ток в течение задержки.

Для данной ленты с температурой T_0 , помещенной в жидкий азот при $T_a = 77$ К, можно оценить характерное время остывания. Используя усредненные параметры (без учета их зависимости от температуры), остывание ленты можно описать уравнением

$$T - T_a = (T_0 - T_a) \cdot \exp(-t/\tau).$$

Характерное время $\tau = m \cdot C/\kappa$, где $m = 0.02$ г – масса ленты длиной 1 см, $C = 100$ Дж/кг – теплоемкость, $\kappa = 5$ Вт/см² – коэффициент теплоотвода в жидком азоте [5]. При сделанных допущениях $\tau = 4$ мс.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ВАХ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

На различных кусках лент критический ток, измеренный на постоянном токе при $T = 77$ К, был в пределах $I_c = (176 \pm 3)$ А. Используя описанное выше устройство, мы изучали ВАХ для амплитуд переменного тока, превышающего критический ток сверхпроводника ($I_a > I_c$). Увеличивая число колебаний тока от 1 до 10 периодов, мы регистрировали зависимость $U_s^*(t)$. Пока токи имели амплитуду ниже $I_a = 221$ А, амплитуда напряжений $U_s^*(t)$ сохранялась постоянной. После этого длительность колебаний тока была увеличена до 2 с. На рис. 3 показан фрагмент зависимости $U_s^*(t)$ при $I_a = 220$ А. Индуктивная помеха в данном случае не исключалась. Постоянство амплитуды U_s^* демонстрирует стационарный режим течения тока. Очевидно, что в этом случае испарение жидкого азота компенсирует нагрев сверхпроводника, когда тот оказывается в резистивном состоянии и генерирует тепло. Таким образом, устойчивый режим работы сохраняется при превышении I_a над I_c на 45 А.

Рис. 3. Фрагмент зависимости напряжения $U_s^*(t)$ на ленте при токе $I_a = 220$...

Увеличение амплитуды тока до 245 А привело к радикальным изменениям поведения $U_s(t)$. На рис. 4 показана зависимость $U_s(t)$ (с исключением помехи) для тока с $I_a = 245$ А. На вставке к рис. 4 представлена критическая часть зависимости в увеличенном масштабе. Вплоть до четвертого периода (0.08 с) вблизи смены знака тока наблюдаются участки с нулевой производной $dU_s/dt = 0$, что свидетельствует о наличии сверхпроводимости на этих интервалах времени. Момент времени, когда производная возрастает (когда $|dU_s/dt| > 0$), на осциллограмме тока соответствует критическому значению I_c . В интервале температур от жидкого азота (77 К) до критической температуры (95–98 К) I_c падает до нуля практически линейно.

Рис. 4. Напряжение на образце при $I_a = 245$ А в течение пяти периодов колебаний тока

Отметим, что пока цуг тока содержал менее четырех периодов, наблюдалось кипение азота, равномерное по всей длине ленты. Когда же цуг был увеличен до пяти периодов (100 мс), на последнем полупериоде напряжение достигло 0.5 В (это видно на рис. 4). Поскольку при $t=90$ мс отсутствует участок с $dU_s/dt=0$, это свидетельствует о том, что часть образца перешла в резистивное состояние. Следует отметить, что наблюдалось сильное локальное вскипание азота, которое сопровождалось резким характерным звуковым хлопком. По-видимому, хлопок возникает из-за кавитационных процессов при переходе режима охлаждения ленты от пузырькового к пленочному.

Сверхпроводимость образца разрушилась, когда напряжение достигло 0.1 В. Для амплитуды тока $I_a=245$ А это соответствует сопротивлению $r=0.41$ мОм. Предварительно была измерена температурная зависимость сопротивления ленты длиной $L=10$ см. При комнатной температуре сопротивление равнялось $R_{300\text{K}} = 40$ мОм, и оно при понижении температуры линейно уменьшалось до $R_{100\text{K}} = 12.5$ мОм. Наблюдаемое на рис. 4 малое сопротивление говорит о том, что в нормальное состояние перешел короткий участок ленты длиной x_n . Величину x_n можно оценить из отношения сопротивлений r к сопротивлению участка между потенциальными контактами вблизи критической температуры при $T = 100$ К. Оценка показывает, что размер локальной нормальной зоны,

$$x_n = r \cdot L/R_{100\text{K}} = 10/12.5 \cdot 0.41 = 0.33 \text{ см,}$$

не превышает нескольких мм.

После отогрева ленты до комнатной температуры визуально на ней не было обнаружено никаких внешних изменений.

Последующее охлаждение в жидком азоте и увеличение числа колебаний до 10 периодов сопровождалось резким ростом напряжения до 20 В перед выключением тока. При этом наблюдалась яркая вспышка света в месте локализации нормальной зоны. Фрагменты видеосъемки и комментарии к ней изложены ниже. На рис. 5 показана зависимость амплитуды U_s^* для тока с $I_a = 245$ А. Можно видеть, что с каждым периодом вблизи смены знака тока происходит увеличение значения dU_s^*/dt . Поскольку амплитуда тока постоянна, это свидетельствует о росте сопротивления. Отметим, что напряжение U_s^* обратилось в нуль строго в момент отключения тока. Если образец перегорает между потенциальными контактами, то измерительная цепь оказывается разорванной, и U_s^* продолжает колебания, соответствующие напряжению вторичной обмотки Tr_1 .

Рис. 5. Осциллограмма $U_s^*(t)$ для 10 колебаний тока с амплитудой $I_a=245$ А

На рис. 6 показано, как амплитуда напряжения на образце U_s увеличивалась во времени до момента отключения тока при длительности цуга $t = 0.2$ с. На вставке к рис. 6 изображен начальный участок этой зависимости из рис. 4, где амплитуды U_s на два порядка ниже. На

пятом периоде колебаний тока сверхпроводимость разрушается, возникает локальное резистивное состояние и сопротивление резко увеличивается. Образование узкого участка нормальной зоны радикально меняет динамику сверхпроводника и не позволяет использовать выводы модельных расчетов, например из работы [6], в которой резистивное состояние однородно по всей длине исследуемого образца.

Рис. 6. Зависимость амплитуды $U_s^*(t)$ для 10 колебаний тока с $I_a=245$ А.

Возникновение локальной нормальной зоны в сверхпроводнике – одна из проблем адекватного описания ВАХ ВТСП на переменном токе. Оно обусловлено низкой скоростью распространения нормальной зоны, а в случае жидкого азота, возможно, хаотичностью охлаждения при пузырьковом кипении жидкого азота. Возникновение узкого участка нормальной зоны, как показывают многочисленные эксперименты, неминуемо приводит к перегоранию материала. Это особенно опасно при малой толщине медного (стабилизирующего) покрытия, как для данной ленты SuperOx.

На рис. 6 видно, что после возникновения узкого нормального участка достаточно 4–5 колебаний тока для “повреждения” образца. Очевидно, что с ростом амплитуды тока это время сократится.

Очевидный вывод из этого эксперимента: устойчивая работа ВТСП на переменном токе возможна лишь при условии постоянства во времени амплитуды U_s . Иными словами, для безопасного измерения динамики ВТСП-лент нельзя допускать возникновения локальной нормальной зоны, т.е. при изменении направления тока производная dU_s/dt должна быть малой.

Применение видеосъемки дало возможность наблюдать процесс развития тепловой неустойчивости: локальное вскипание азота при зарождении нормальной зоны, рост температуры до очень высоких значений и испарение материала ленты в жидком азоте. На рис. 7 представлено несколько кадров из видеозаписи. За начало (кадр 0) принято появление очагов перегрева. Время кадров, отсчитанное от первого, указано на каждом снимке. На первом снимке видны четыре красные точки зарождения очагов нагрева ленты. Затем появляются две яркие вспышки с максимальной интенсивностью на третьем снимке. В этот момент выключается ток, и в последующих снимках яркость свечения снижается. На последнем снимке (91 мс) видны хаотические яркие точки, которые окончательно исчезли через 373 мс после “нулевого” кадра.

Рис. 7. Фотографии видеосъемки при протекании тока с амплитудой $I_a=245$ А.

На рис. 8 представлена фотография ленты после ее отогрева. Как видно, испарение металла ленты происходило на двух участках, причем на правом коротком участке перемычка металла оказалась более узкая. Неполное перегорание ленты объясняется

прерыванием тока, которое ограничило поступление энергии. Общая длина двух выгоревших частей ленты на рис. 8 составляет около 11 мм. Заметим, что оценка, сделанная выше для участка нормальной зоны, составила примерно 3.3 мм, т.е. разогрев ленты и ее испарение носят локальный характер. За границами зон испарения видны темные полосы. Вероятнее всего, это сверхпроводник YBCO и буферные слои. Затем идет красноватый слой меди. Вблизи границ медь рекристаллизовалась и имела зернистую структуру, а за пределами зоны размером 3–4 мм поверхность осталась гладкой (какой она была первоначально).

Рис. 8. Фотография ленты после частичного испарения материала

С увеличением амплитуды тока нормальная зона и критические явления, очевидно, возникают раньше. В нашем случае при $I_a = 265\text{A}$ нормальная зона возникла уже на втором полупериоде колебаний тока. Амплитуда U_s увеличивалась до четвертого периода, и на следующем полупериоде произошло перегорание ленты.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный формирователь тока предназначен для регулирования числа колебаний переменного тока с различными конфигурациями. Пошаговое увеличение числа колебаний тока привносит в образец дополнительное тепло небольшими порциями, что позволяет видеть динамику сверхпроводника на каждом полупериоде тока. В частности, можно определить критический ток и соответственно оценить температуру сверхпроводника. Формирователь позволяет избежать зарождения нормальной зоны до того, как произойдут необратимые повреждения материала. Регулируя амплитуду и число колебаний тока, можно изучать возникновение неустойчивости сверхпроводящего состояния в закритических режимах, т.е. определять условия применения сверхпроводников в цепях переменного тока.

Используя оптическую регистрацию, удастся наблюдать развитие термической неустойчивости сверхпроводника в жидком азоте вплоть до испарения материала.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны А.В. Полякову за консультации по схемотехнике.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках тематического плана НИЦ “Курчатовский институт”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Selvamanickam V., Chen Y., Kesgin I. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2011. V. 21. № 3. P. 3049. <http://doi.org/10.1109/TASC.2011.2107310>*

2. *Pelegriñ J., Martínez E., Angurel L.A., Yi-Yuan Xie, Selvamanickam V.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2011. V. 21. №3. P. 3041. <http://doi.org/10.1109/TASC.2010.2084982>
3. *Lacroix C., Giguère J., Hartman S.-M.B. et al.* // Supercond. Sci. Technol. 2022. V. 35. P. 055009. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ac56ff>
4. *Красноперов Е.П.* // Сверхпроводимость: фундаментальные и прикладные исследования, 2024. №4. С . 43. <https://doi.org/10.62539/2949-5644-2024-0-4-43-47>
5. *Wozniak Ł., Surdacki P., Jaroszynski L.* // Applied Computer Science. 2017. V. 13. № 2. P. 23. <https://doi.org/10.23743/acs-2017-11>
6. *Романовский В.Р., Макаренко М.Н.* // ВАНТ. 2023. Т. 46. № 2. С. 87. <https://elibrary.ru/item.asp?id=54320197>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Электрическая схема формирователя тока: силовой трансформатор (Tr_1), питающий измерительную цепь; блок управления с микроконтроллером (МК), формирующий импульсы для управления тиристорами.
- Рис. 2.** Некоторые варианты прерывания тока в измерительной цепи.
- Рис. 3.** Фрагмент зависимости напряжения $U_s^*(t)$ на ленте при токе $I_a=220$ А (без коррекции индуктивной помехи).
- Рис. 4.** Напряжение на образце при $I_a=245$ А в течение 5 периодов колебаний тока.
- Рис. 5.** Осциллограмма $U_s^*(t)$ для 10 колебаний тока с амплитудой $I_a=245$ А.
- Рис. 6.** Зависимость амплитуды $U_s^*(t)$ для 10 колебаний тока с $I_a=245$ А. На вставке изображена осциллограмма напряжения $U_s(t)$ из рис. 4.
- Рис. 7.** Фотографии видеосъемки при протекании тока с амплитудой $I_a=245$ А. Цифрами обозначено время в мс от начала появления первых признаков горения.
- Рис. 8.** Фотография ленты после частичного испарения материала: 1 – медный слой, 2 – подложка хастеллой, 3 – кабель (диаметром 2 мм) измерения напряжения U_s^* .

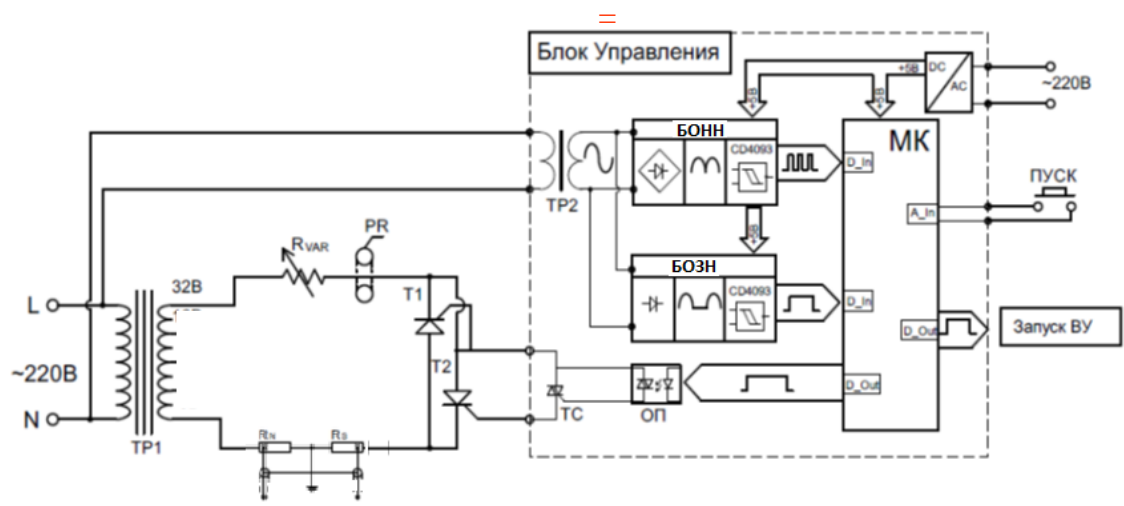


Рис. 1.

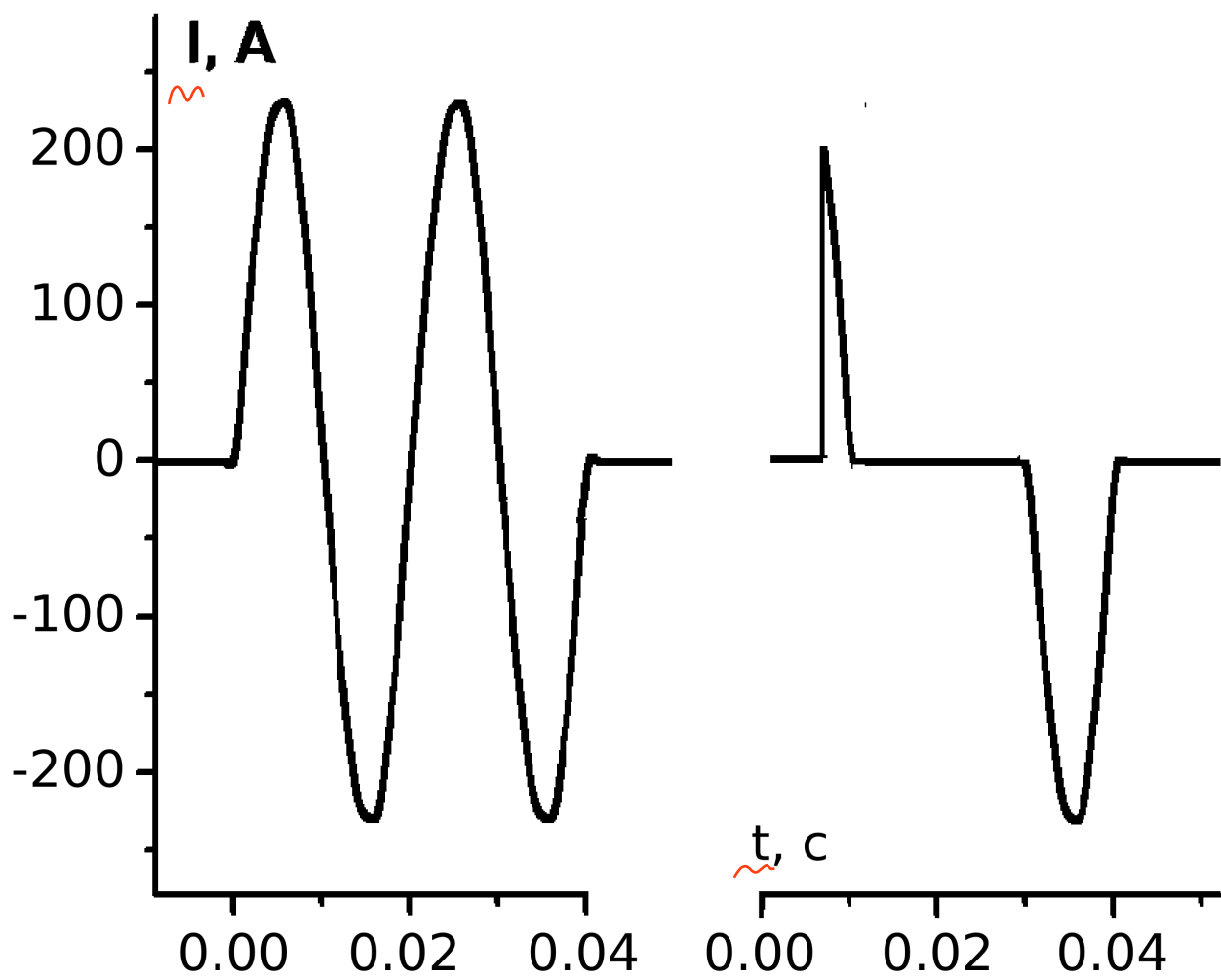


Рис. 2.

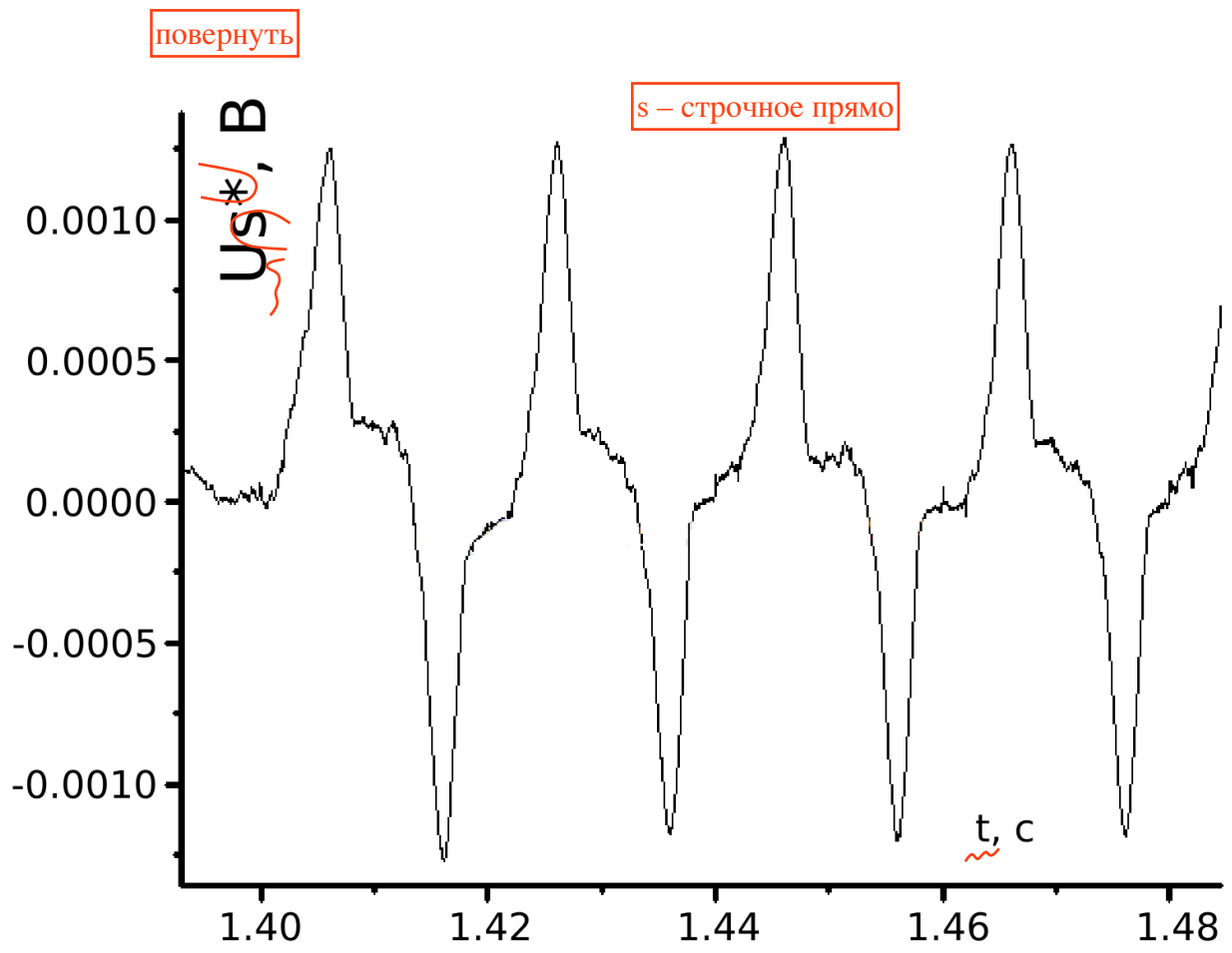


Рис. 3.

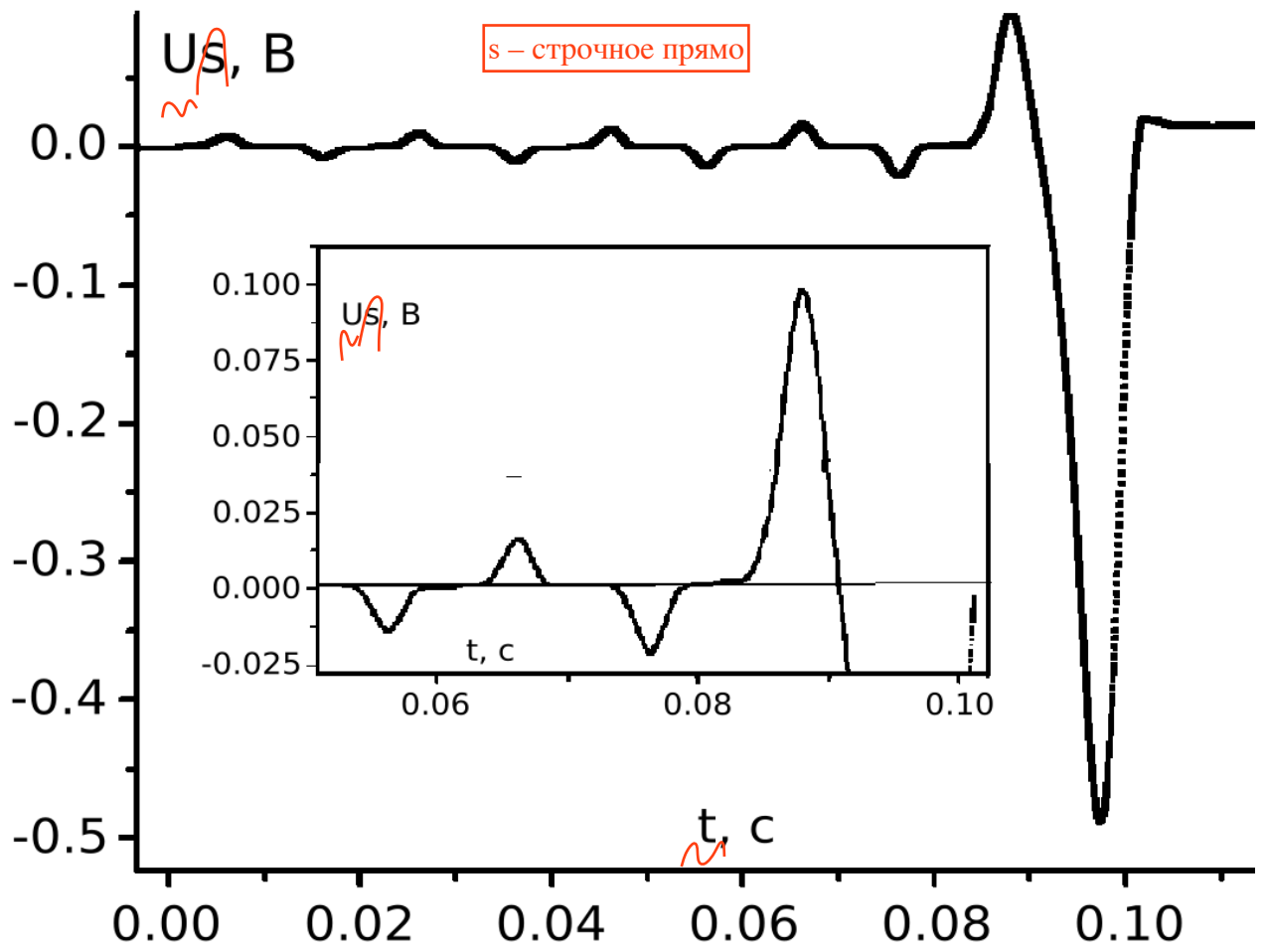


Рис. 4.

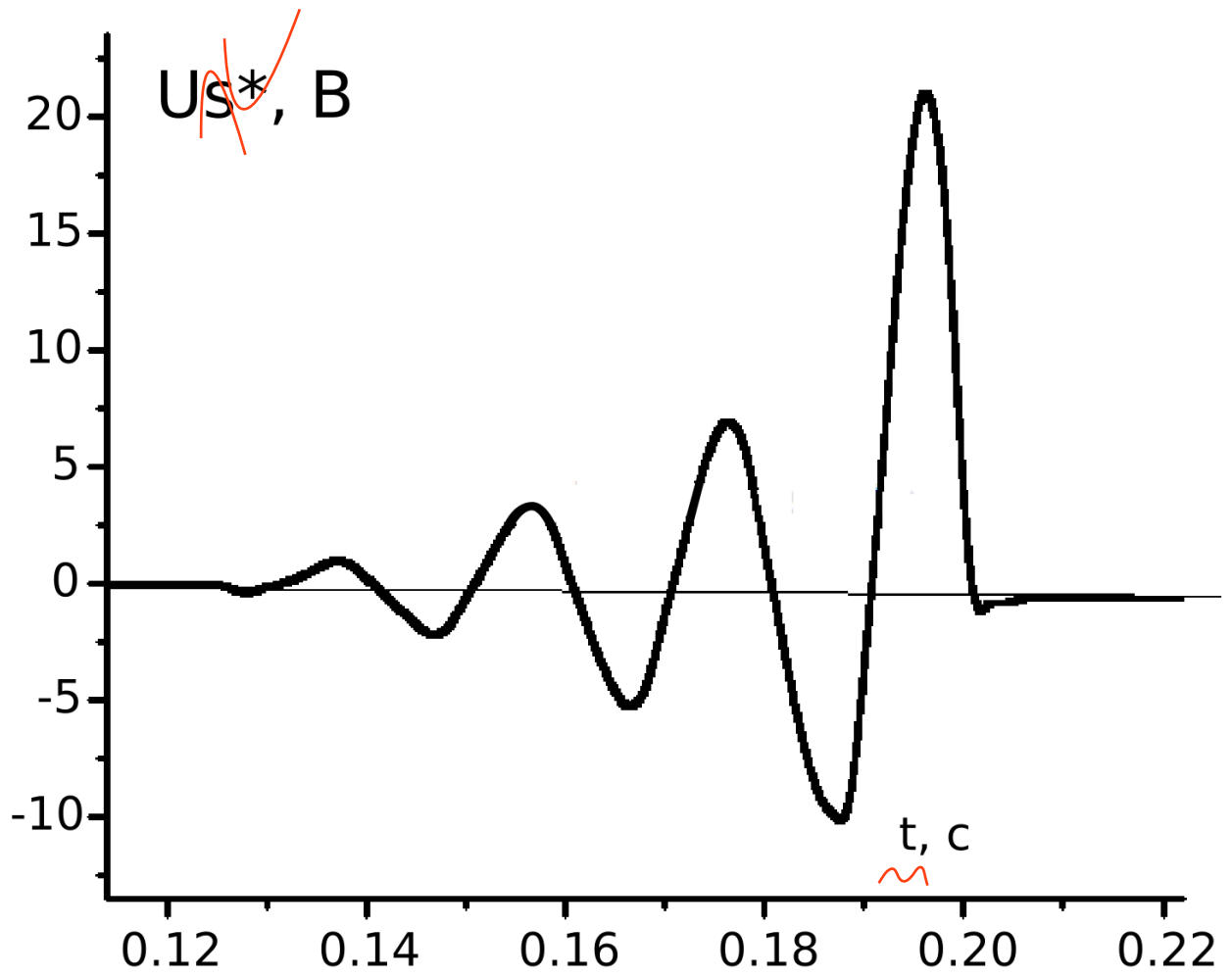


Рис. 5.

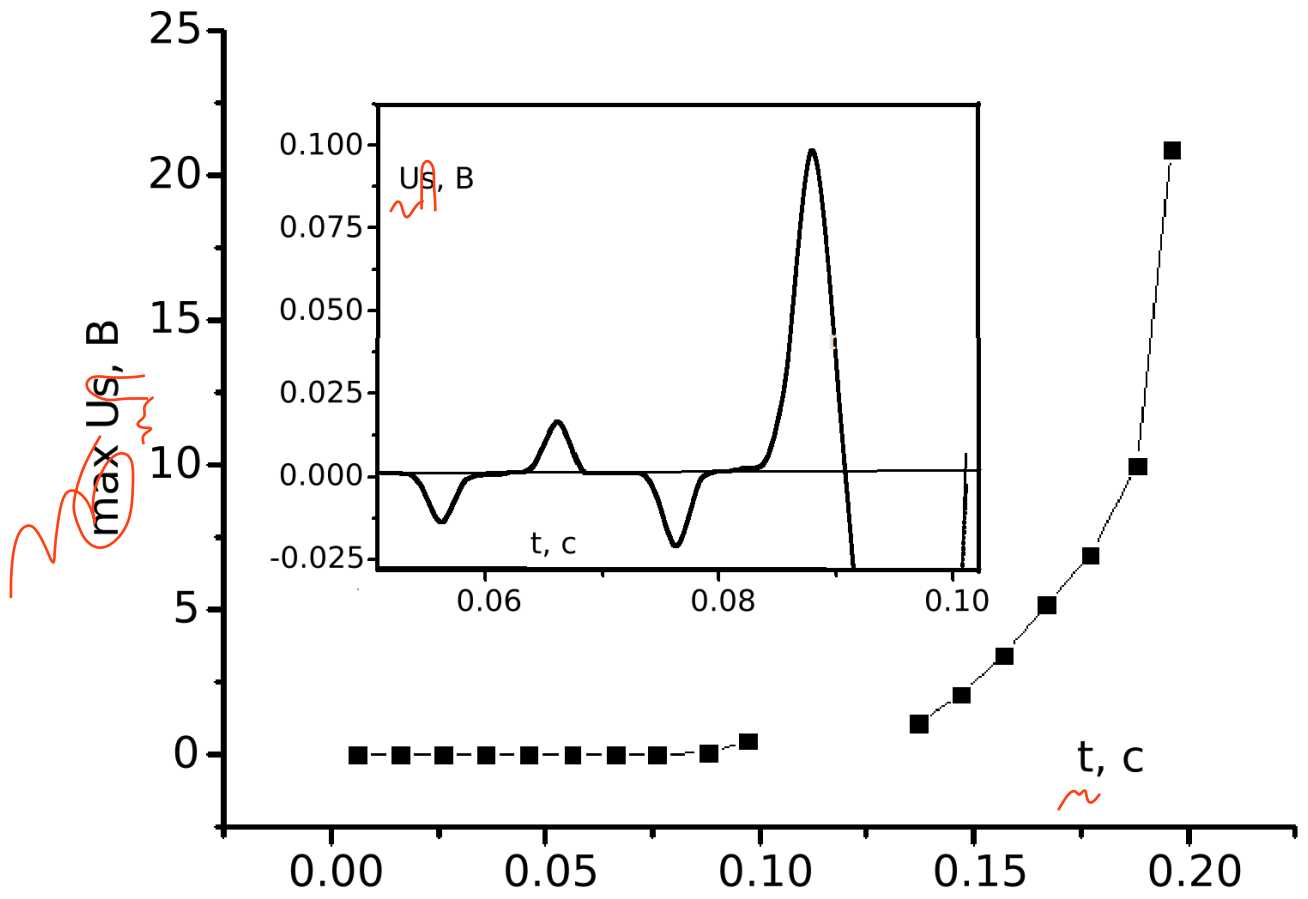


Рис. 6.

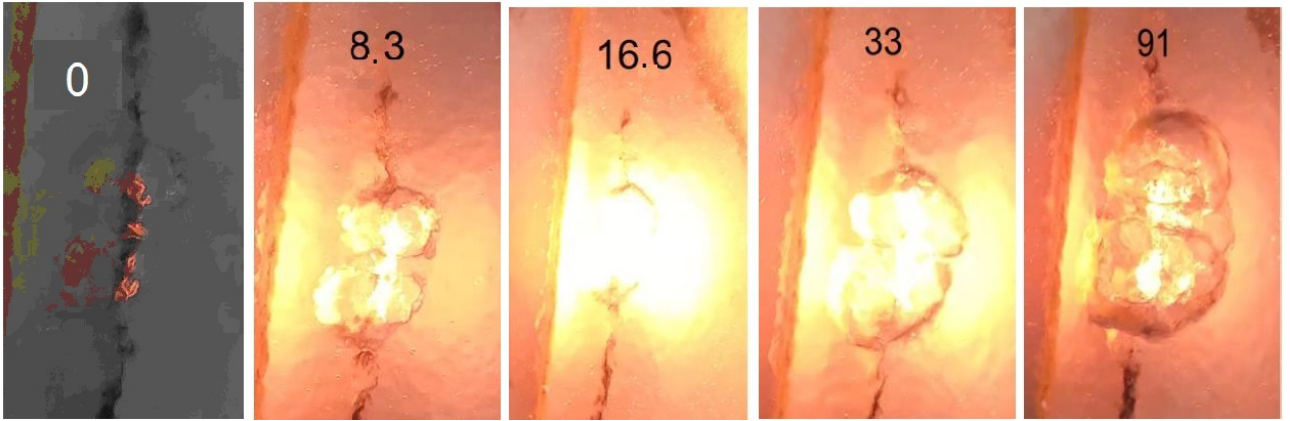


Рис. 7.

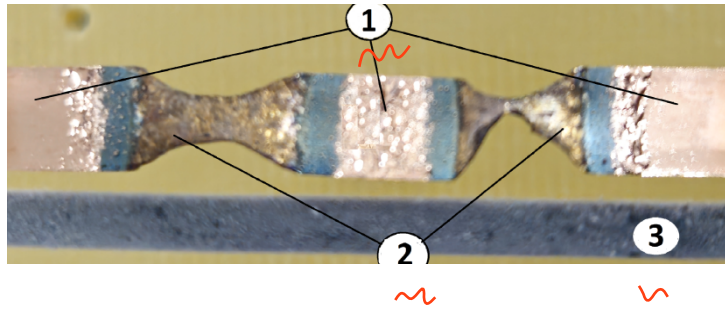


Рис. 8.