

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ
ДВУНАПРАВЛЕННОГО ТИРАТРОНА ДУГОВОГО РАЗРЯДА
ИМПУЛЬСАМИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ
С НАНОСЕКУНДНЫМ ФРОНТОМ**

© 2025 г. С. В. Коротков^{а,*}, А. Л. Жмодиков^а, Д. А. Коротков^а

^аФизико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

Российской академии наук

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

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

Поступила в редакцию 09.01.2025 г.

После доработки 13.01.2025 г.

Принята к публикации 24.02.2025 г.

Исследован процесс переключения мощного тиратрона ТДИЗ-100к/75Д полупроводниковым генератором, который имеет малый разброс моментов срабатывания (джиттер составляет около 3 нс) относительно момента приложения импульса управления и обеспечивает высокие скорости нарастания импульсов запускающего напряжения (примерно 4 кВ/нс) и импульсов тока запуска (приблизительно 100 А/нс). Показано, что при таком переключении джиттер импульса тока запуска тиратрона относительно импульса запускающего напряжения составляет менее 1 нс, а джиттер фронта импульса силового тока через тиратрон относительно импульса тока запуска не превышает 5 нс как при положительном, так и при отрицательном потенциале анода, если запуск тиратрона осуществляется соответственно со стороны катода или со стороны анода.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для эффективной работы мощных электрофизических устройств, используемых в различных областях науки и техники, необходимо быстро коммутировать большие электрические мощности. При этом коммутаторы должны иметь малые потери энергии, длительную надежность и малый разброс моментов срабатывания (джиттер).

В качестве таких коммутаторов могут быть использованы псевдоискровые переключатели (PSS) [1–7], известные также как разрядники низкого давления. В микро- и субмикросекундных диапазонах они позволяют коммутировать гигаваттные мощности и имеют при этом определенные преимущества перед игнитронами и разрядниками высокого давления, обусловленные, соответственно, отсутствием ртутного наполнения и более долгим

сроком службы. PSS можно рассматривать как усовершенствованную альтернативу тиратронам, которые имеют небольшой джиттер и способны коммутировать быстро нарастающие импульсы тока. В отличие от тиратронов, PSS могут включаться как при положительном, так и при отрицательном потенциале анода [8].

В настоящее время наиболее мощными отечественными PSS являются выпускаемые в ООО “Импульсные технологии” (г. Рязань) тиратроны дугового разряда типа ТДИ. Они имеют рабочее напряжение в десятки кВ, при этом они способны коммутировать субмикросекундные импульсы тока с амплитудой десятки кА [9–11].

В работе [12] показано, что тиратрон ТДИ1-150к/25 в режиме коммутации импульсов тока с амплитудой десятки кА имеет малый джиттер относительно момента приложения запускающего импульса напряжения (не более 10 нс) при использовании запускающего генератора (ЗГ), обеспечивающего фронт импульсов запускающего напряжения около 10 нс. Определенным недостатком этого ЗГ является то, что в качестве коммутатора в нем используется искровой разрядник, величина джиттера которого превышает величину джиттера тиратрона. В результате создается большой разброс моментов срабатывания тиратрона относительно сигнала управления, инициирующего включение ЗГ. Это обстоятельство препятствует созданию многокомпонентных электрофизических устройств, в которых требуется высокостабильное включение коммутаторов (например, при использовании нескольких тиратронов, включаемых с фиксированной задержкой).

Целью статьи является исследование процессов переключения мощного ТДИ при его запуске с помощью разработанного авторами ЗГ на основе прерывателя тока с наносекундным временем выключения. Прерыватель выполнен в виде блока последовательно соединенных структур дрейфовых диодов с резким восстановлением (ДДРВ) [13, 14], имеет очень малый джиттер и способен формировать более высокую скорость нарастания запускающих импульсов по сравнению с ЗГ, описанным в работе [12].

2. ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА

На рис. 1 приведена электрическая схема испытательного стенда, содержащая конденсатор C_0 , заряженный до напряжения U_0 , а также монтажную индуктивность L_0 и исследуемый двунаправленный тиратрон T (ТДИЗ-100к/75Д), который имеет рабочее напряжение 50 кВ и способен коммутировать импульсный ток с амплитудой до 50 кА, протекающий как от анода (А) к катоду (К), так и от катода к аноду. Возможность эффективно включаться при разной полярности приложенного напряжения обеспечивается тем, что ТДИЗ-100к/75Д имеет два узла запуска. Со стороны катода расположен узел запуска с выводами ПЭ_к (+) и ПЭ_к (-), а со стороны анода – узел запуска с выводами ПЭ_а (+) и ПЭ_а (-). Когда к аноду тиратрона в исходном состоянии приложен положительный потенциал,

запускающий импульс напряжения подается на поджигающие электроды ПЭ_к, а в противоположном случае (при отрицательном потенциале анода) – на поджигающие электроды ПЭ_а.

Рис. 1. Электрическая схема испытательного стенда...

На рис. 2 приведена электрическая схема разработанного генератора запуска тиратрона.

Рис. 2. Электрическая схема запускающего генератора

Импульсы запуска формируются с помощью блока ДДРВ, который состоит из 14 последовательно соединенных диодных структур диаметром 16 мм. Условия быстрого выключения блока ДДРВ достигаются следующим образом. Сначала по сигналу управления U_y блок управления (БУ) вырабатывает оптический сигнал запуска транзисторного коммутатора (ТК). После включения ТК исходно заряженный до напряжения 900 В конденсатор C_1 быстро разряжается через первичную обмотку w_1 трансформатора (Тр). В результате в блок ДДРВ коммутируется импульс прямого тока с принципиально малой длительностью (около 450 нс). Этот ток обеспечивает накопление заряда в диодных структурах и зарядку конденсатора C_2 . В момент окончания прямого тока происходит насыщение сердечника трансформатора Тр, и конденсатор C_2 быстро разряжается через его вторичную обмотку w_2 . При этом в блок ДДРВ коммутируется импульс обратного тока, и из диодных структур за принципиально малое время (примерно 150 нс) выносятся весь накопленный заряд. В результате блок ДДРВ выключается за время около 3 нс и протекающий через него ток $I_{\text{вых}}$ коммутируется в коаксиальный кабель КК. В процессе коммутации на входе КК формируется импульс напряжения $U_{\text{вых}}=I_{\text{вых}}Z$, где Z – волновое сопротивление кабеля (50 Ом). В этих условиях на конце КК возникает быстро нарастающий импульс запускающего напряжения $U_{\text{зап}}$. Он прикладывается к поджигающим электродам тиратрона Т и обеспечивает генерацию импульса тока запуска $I_{\text{зап}}$. В результате тиратрон быстро включается и коммутирует мощный импульс тока I . Резистор R_2 ограничивает ток из узла запуска тиратрона в ЗГ, обусловленный напряжением, которое возникает на межэлектродном промежутке тиратрона при нарастании тока I .

Зарядка конденсатора C_1 осуществляется с помощью высокочастотного зарядного устройства ЗУ, выполненного на основе транзисторного ключа и повышающего импульсного трансформатора. Питание ЗУ и драйверов в ТК обеспечивает источник ИП. Изоляционная прочность трансформатора Тр соответствует рабочему напряжению тиратрона. Для включения транзисторного коммутатора ТК используется кварцевый оптический канал.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты экспериментального исследования ТДИЗ-100к/75Д при использовании разработанного ЗГ иллюстрируются осциллограммами на рис. 3–9.

Осциллограммы на рис. 3, 4 соответствуют экспериментам, проведенным на частоте 10 Гц при отключенной цепи C_0L_0 .

На рис. 3а, б приведены осциллограммы импульсов напряжения $U_{\text{зап}}$, полученные при запуске осциллографа импульсами U_y , которые инициируют включение блока БУ. Осциллограммы на рис. 3а соответствуют запуску тиратрона со стороны катода: выходы запускающего генератора $U_{\text{вых}(+)}$, $U_{\text{вых}(-)}$ подключены к электродам ПЭ_{к(+)} и ПЭ_{к(-)}. Осциллограммы на рис. 3б соответствуют запуску тиратрона со стороны анода: выходы запускающего генератора $U_{\text{вых}(+)}$, $U_{\text{вых}(-)}$ подключены к электродам ПЭ_{а(+)} и ПЭ_{а(-)}. Как видно из осциллограмм, величина джиттера импульсов $U_{\text{зап}}$ относительно импульсов U_y не превышает 3 нс, что свидетельствует о малом разбросе моментов срабатывания ЗГ.

Рис. 3. Осциллограммы импульсов запускающего напряжения $U_{\text{зап}}$.

На рис. 4а приведены осциллограммы импульсов $U_{\text{зап}}$ и $I_{\text{зап}}$, соответствующие запуску тиратрона со стороны катода. На рис. 4б показаны аналогичные осциллограммы при запуске тиратрона со стороны анода.

Рис. 4. Осциллограммы импульсов запускающего напряжения $U_{\text{зап}}$ и тока запуска $I_{\text{зап}}$.

Из осциллограмм следует, что разработанный ЗГ обеспечивает очень малый разброс моментов генерации импульсов тока запуска $I_{\text{зап}}$ относительно моментов приложения импульсов запускающего напряжения $U_{\text{зап}}$ (менее 1 нс) и высокие скорости нарастания импульсов $U_{\text{зап}}$ (примерно 4 кВ/нс) и $I_{\text{зап}}$ (около 100 А/нс).

На рис. 5 приведена осциллограмма тока I , протекающего через тиратрон при разряде конденсатора C_0 , исходно заряженного до напряжения $U_0 = +20$ кВ. Она получена при запуске тиратрона со стороны катода. На рис. 6 показаны соответствующие этим условиям осциллограммы тока I и напряжения на тиратроне U .

Рис. 5. Осциллограмма тока I .

Рис. 6. Осциллограммы тока I и напряжения U , полученные при положительной полярности.

В описанном режиме был зафиксирован малый джиттер фронта импульсов тока I относительно импульсов тока запуска $I_{\text{зап}}$. Он иллюстрируется осциллограммами, приведенными на рис. 7.

Рис. 7. Осциллограммы тока запуска $I_{\text{зап}}$ и тока I , полученные при положительной полярности.

На рис. 8, 9 показаны осциллограммы процесса переключения тиратрона, полученные при отрицательной полярности напряжения зарядки конденсатора C_0 ($U_0 = -20$ кВ). Они соответствуют запуску тиратрона со стороны анода.

Рис. 8. Осциллограммы тока I и напряжения U , полученные при отрицательной полярности напряжения зарядки конденсатора C_0 .

Рис. 9. Осциллограммы тока запуска $I_{\text{зап}}$ и тока I , полученные при отрицательной полярности напряжения зарядки конденсатора C_0 .

Из осциллограмм на рис. 6–9 следует, что в условиях запуска мощными импульсами высокого напряжения с наносекундным фронтом исследуемый тиратрон при разной полярности приложенного напряжения имеет сравнительно малое время переключения в состояние высокой проводимости (около 100 нс) и сравнительно малый джиттер (примерно 5 нс).

При проведении исследований осциллограммы импульсов тока запуска тиратрона и импульсов силового тока через тиратрон были получены с помощью датчиков тока ДТ_у и ДТ₀, выполненных в виде лабораторных поясов Роговского, калиброванных с помощью датчика тока Pearson current monitor 410. Для получения осциллограмм импульсов напряжения использовался щуп Tektronix P6015A. Выходные напряжения блока накала в процессе экспериментов поддерживались на уровне 5.0 В.

4. ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований показывают, что использование разработанного запускающего генератора на основе блока дрейфовых диодов с резким восстановлением позволяет обеспечить высокие коммутационные характеристики тиратрона дугового разряда ТДИЗ-100к/75Д, слабо зависящие от полярности исходно приложенного напряжения.

Так, при уровне силового напряжения 20 кВ тиратрон способен коммутировать импульсы тока с амплитудой около 17 кА и фронтом примерно 500 нс, время его включения составляет приблизительно 100 нс, а величина джиттера фронта импульсов коммутируемого тока относительно сигналов запуска не превышает 5 нс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Frank K., Christiansen J. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1989. V. 17. № 5. P. 748. <https://doi.org/10.1109/27.41195>
2. Коваль Н.И., Королев Ю.Д., Пономарев В.Б. // Физика плазмы. 1989. Т. 15. №. 6. С. 747.
3. Бочков В.Д., Зайдман С.Ш., Патрушев Д.П. // ПТЭ. 1992. № 1. С. 229.
4. Tkotz R., Gortler A., Christiansen J., Dollinger S., Frank K., Heine F., Herleb U., Insam S., Kowalewicz R., Mehr T., Poister A., Prucker U., Schlaug M., Schwandner A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1995. V. 23. № 3. P. 309. <https://doi.org/10.1109/27.402318>

5. *Naweed A., Kiefer J., Neff W.J., Lebert R.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1995. V. 23. № 3. P. 347.
<https://doi.org/10.1109/27.402323>
6. *Бочков В.Д., Дягилев В.М., Королев Ю.Д., Ушич В.Г.* // ПТЭ. 1998. № 5. С. 91.
7. *Bochkov V. D., Dyagilev V. M., Ushich V.G., Frants O.B., Korolev Yu. D., Sheirlyakin I.A., Frank K.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2001. V. 29. № 5. Part 1. P. 802.
<https://doi.org/10.1109/27.964478>
8. *Frank K., Korolev Yu.D., Kuzmichev A.I.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. V. 30. № 1. Part 3. P. 357. <https://doi.org/10.1109/TPS.2002.1003880>
9. *Verma R., Rawat R. S., Lee P., Springham S. V., Tan T. L.* // J. Fusion Energy. 2012. V. 32. P. 2. <https://doi.org/10.1007/s10894-012-9517-5>
10. *Bogolyubov E.P., Bochkov V.D., Veretennikov V.A., Vekhoreva L.T., Gribkov V.A., Dubrovskii A.V., Ivanov Yu.P., Isakov A.I., Krokhin O.N., Lee P., Lee S., Nikulin V.Ya., Serban A., Silin P.V., Feng X., Zhang G.X.* // Physica Scripta. 1998. V. 57. № 4. P. 488.
<https://doi.org/10.1088/0031-8949/57/4/003>
11. *Жарова Н.В., Ратахин Н.А., Саушкин А.В., Федущак В.Ф., Эрфорт А.А.* // ПТЭ. 2006. № 3. С. 141.
12. *Gribkov V. A., Scholz M., Bochkov V.D., Dubrovsky A.V., Miklaszewski R., Karpinski L., Strzyzewski P., Lee P., Lee S.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2004. V. 37. № 15. P. 2107.
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/37/15/009>
13. *Grekhov I., Efanov V., Kardo-Sysoev A., Shenderoy S.* // Solid State Electronics. 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)
14. *Коротков С. В., Воронков В. Б., Аристов Ю. В.* // ПТЭ. 2015. № 4. С. 48.
<https://doi.org/10.7868/S0032816215040072>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Электрическая схема испытательного стенда; А – анод; К – катод; ПЭ_{к(+)}, ПЭ_{к(-)} – поджигающие электроды со стороны катода; ПЭ_{а(+)}, ПЭ_{а(-)} – поджигающие электроды со стороны анода; БН – блок накала.
- Рис. 2.** Электрическая схема запускающего генератора: D1 – HER308, 2 посл.; D2 – HER508, – 4 посл.; Тр – $w_1=1$, $w_2=4$ (сердечник из 6 ферритовых колец НМС 2500 с размерами $40 \times 25 \times 11$ мм³); ТК – IRGPS60B120KDP, 3 паралл.; ДДРВ – блок дрейфовых диодов с резким восстановлением; КК – RG213U (50 Ом, длина 1/5 м); ИП – RS-15-24; ЗУ – лабораторное зарядное устройство; БУ – лабораторный блок управления.
- Рис. 3.** Осциллограммы импульсов запускающего напряжения $U_{\text{зап}}$.
- Рис. 4.** Осциллограммы импульсов запускающего напряжения $U_{\text{зап}}$ и тока запуска $I_{\text{зап}}$.
- Рис. 5.** Осциллограмма тока I .
- Рис. 6.** Осциллограммы тока I и напряжения U , полученные при положительной полярности напряжения зарядки конденсатора C_0 .
- Рис. 7.** Осциллограммы тока запуска $I_{\text{зап}}$ и тока I , полученные при положительной полярности напряжения зарядки конденсатора C_0 .
- Рис. 8.** Осциллограммы тока I и напряжения U , полученные при отрицательной полярности напряжения зарядки конденсатора C_0 .
- Рис. 9.** Осциллограммы тока запуска $I_{\text{зап}}$ и тока I , полученные при отрицательной полярности напряжения зарядки конденсатора C_0 .

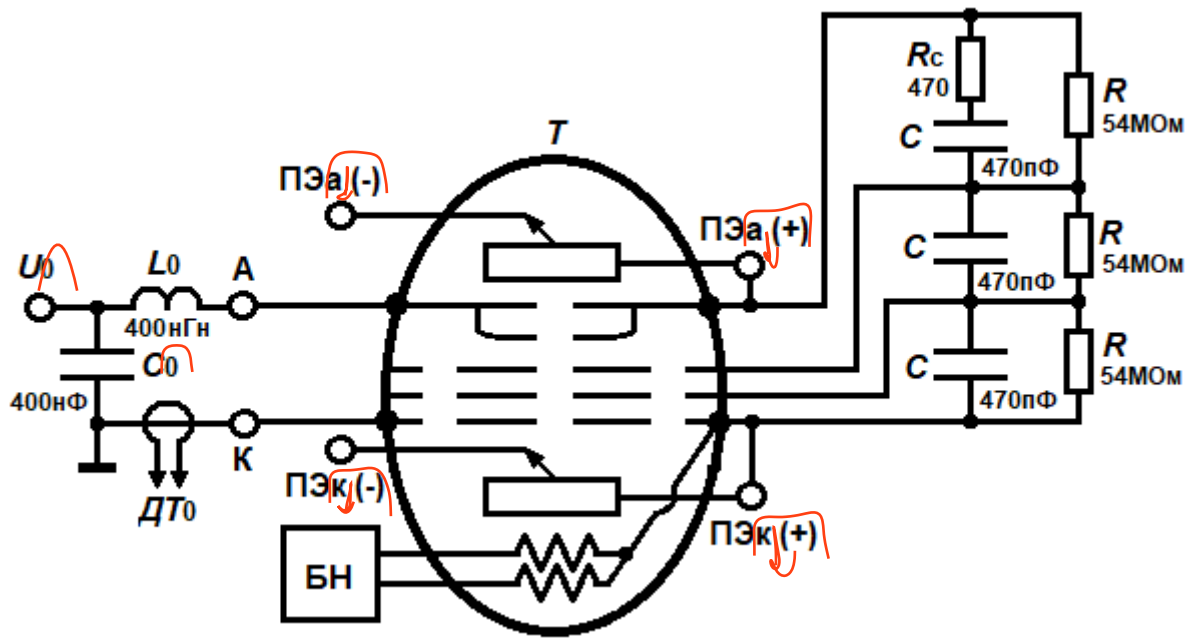


Рис. 1

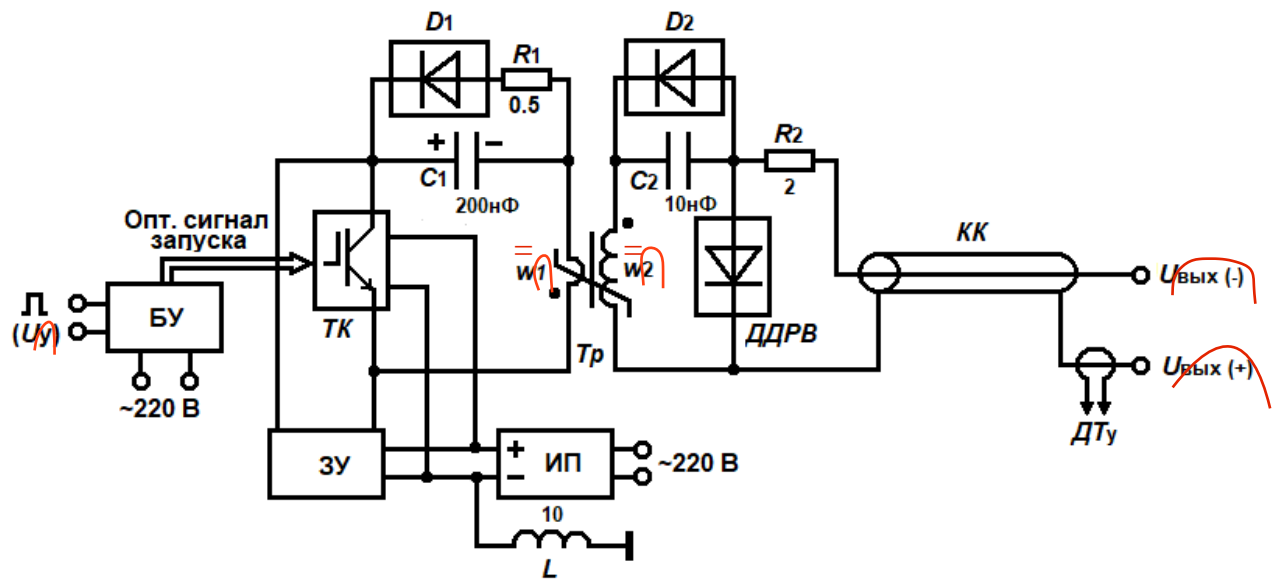


Рис. 2

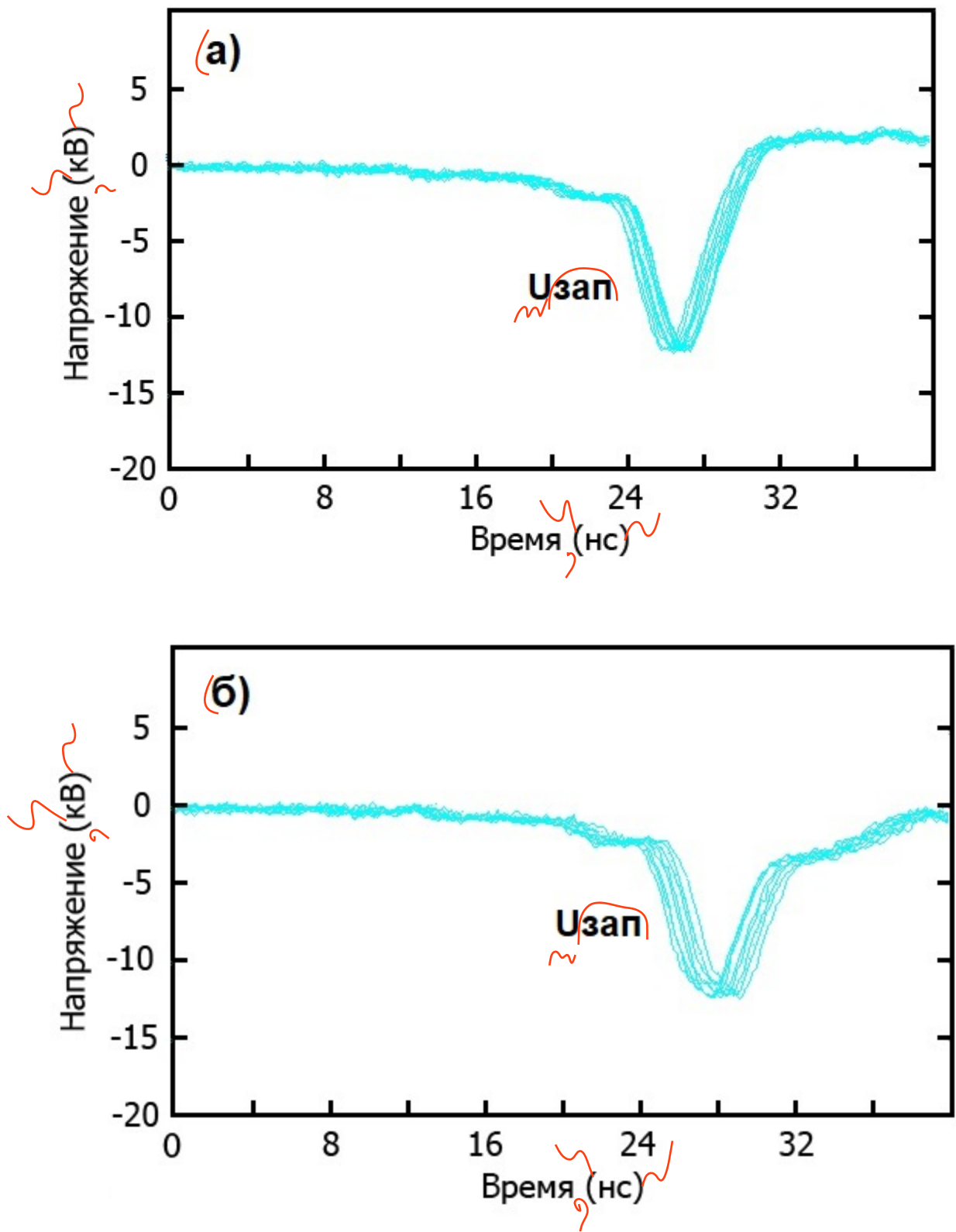


Рис. 3

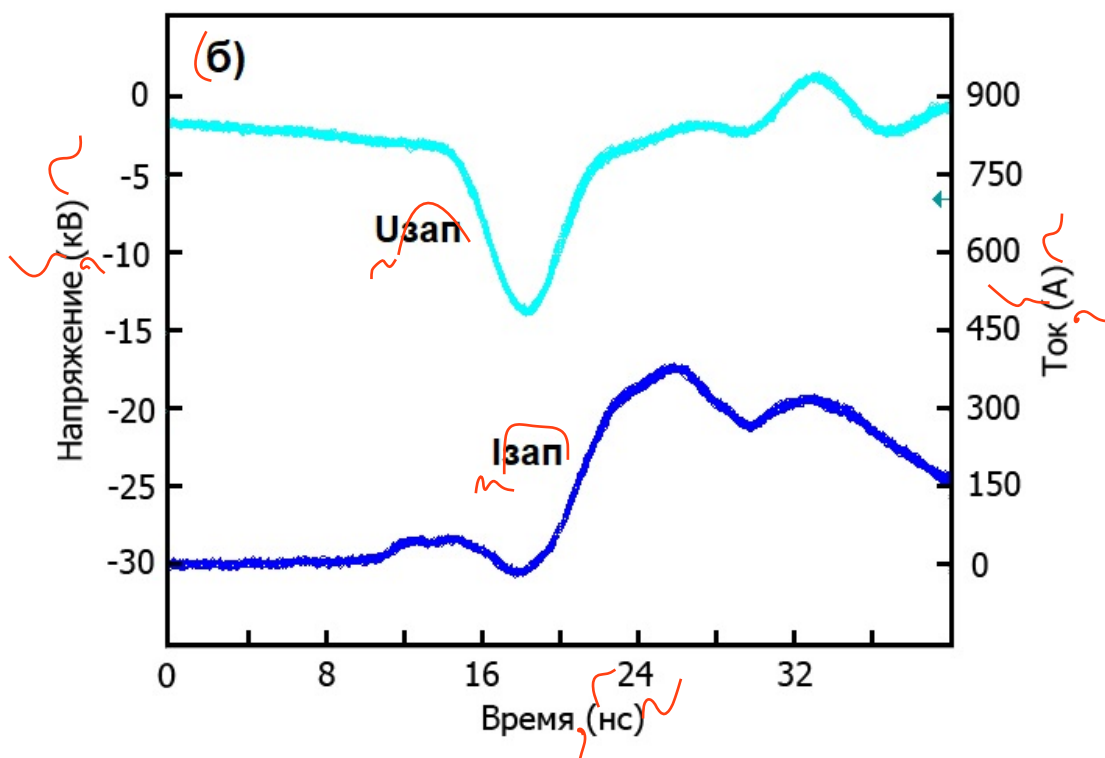
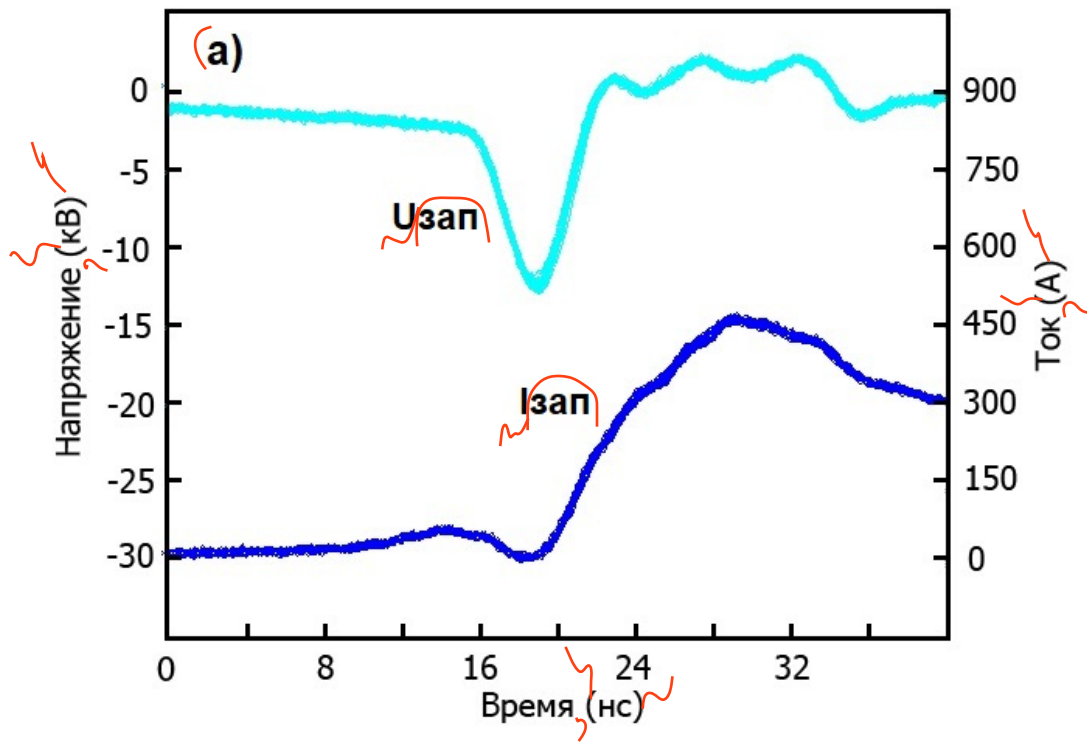


Рис. 4.

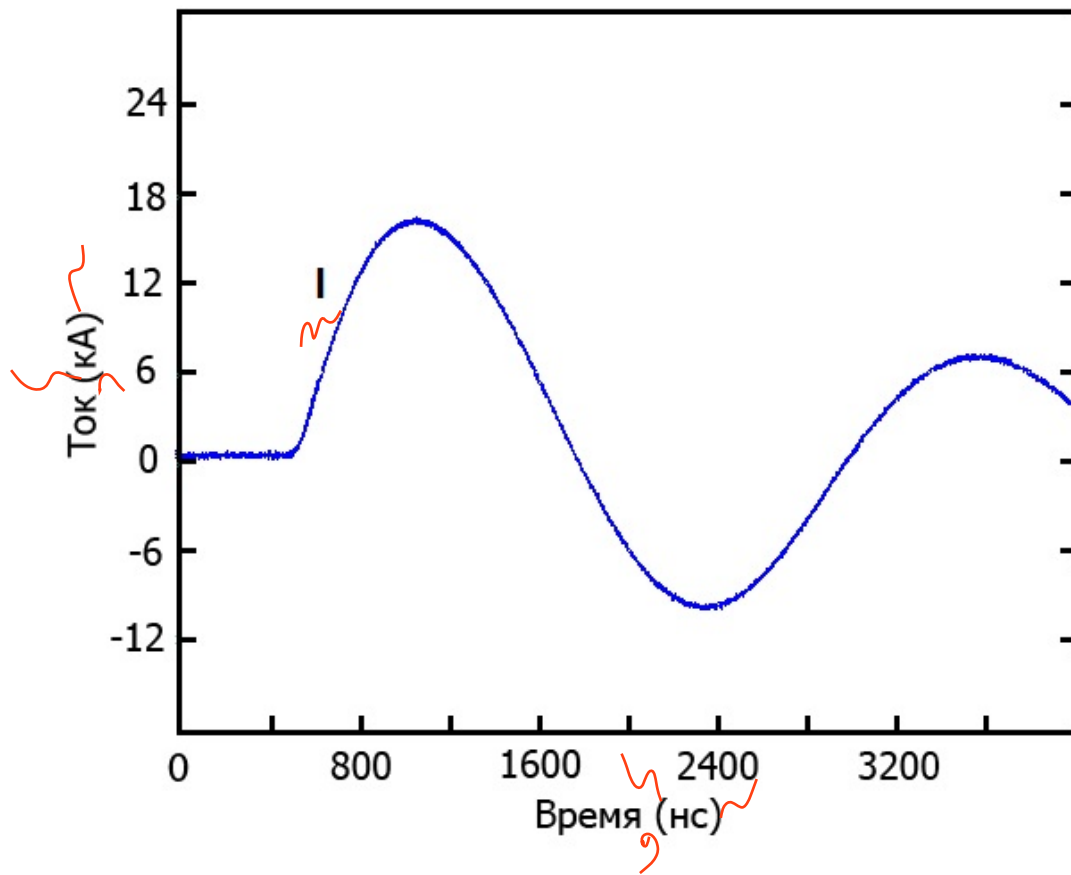


Рис. 5.

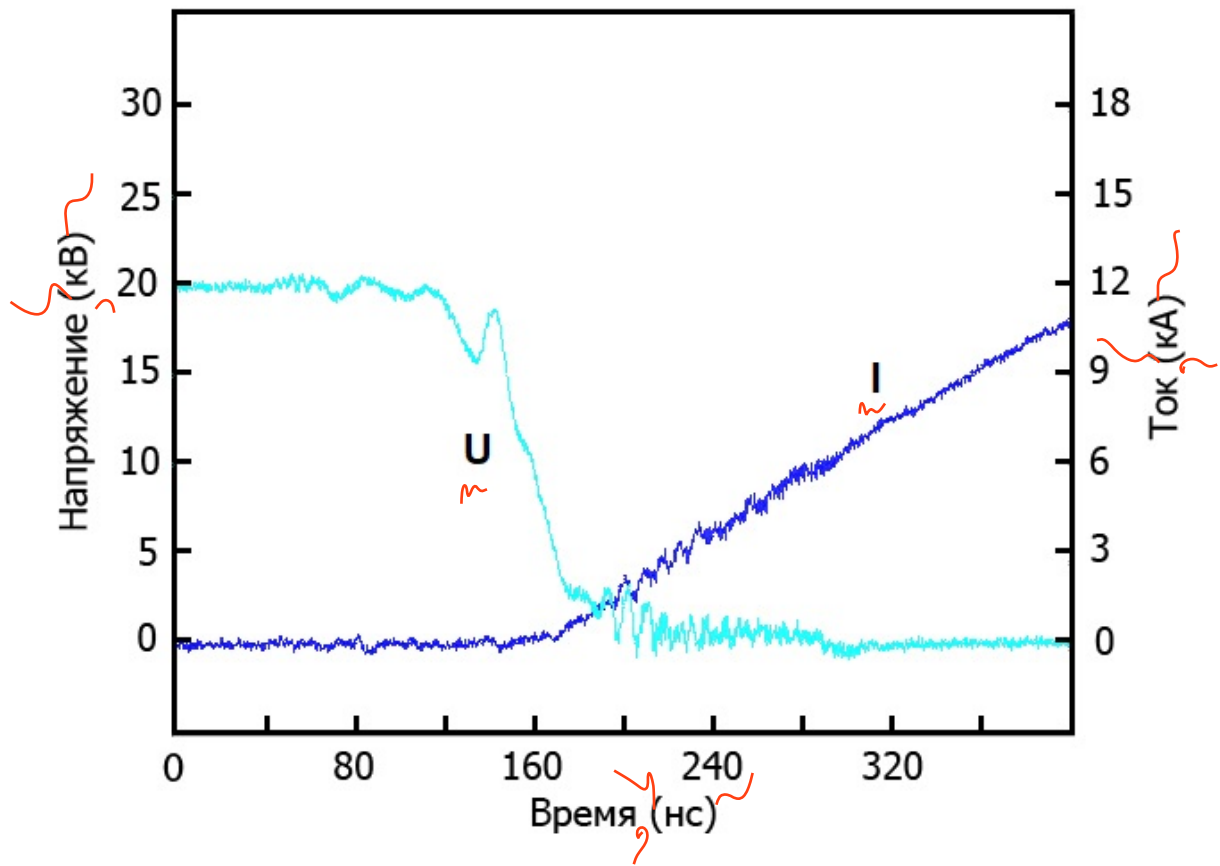


Рис. 6.

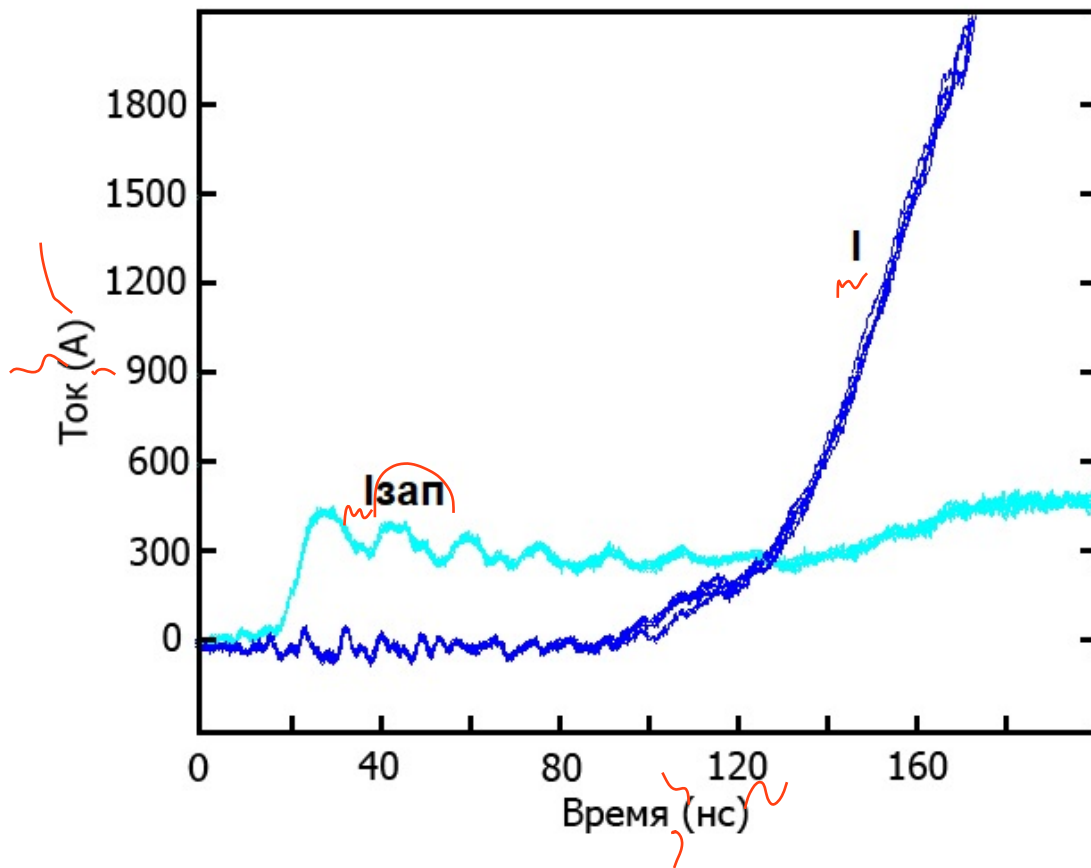


Рис. 7.

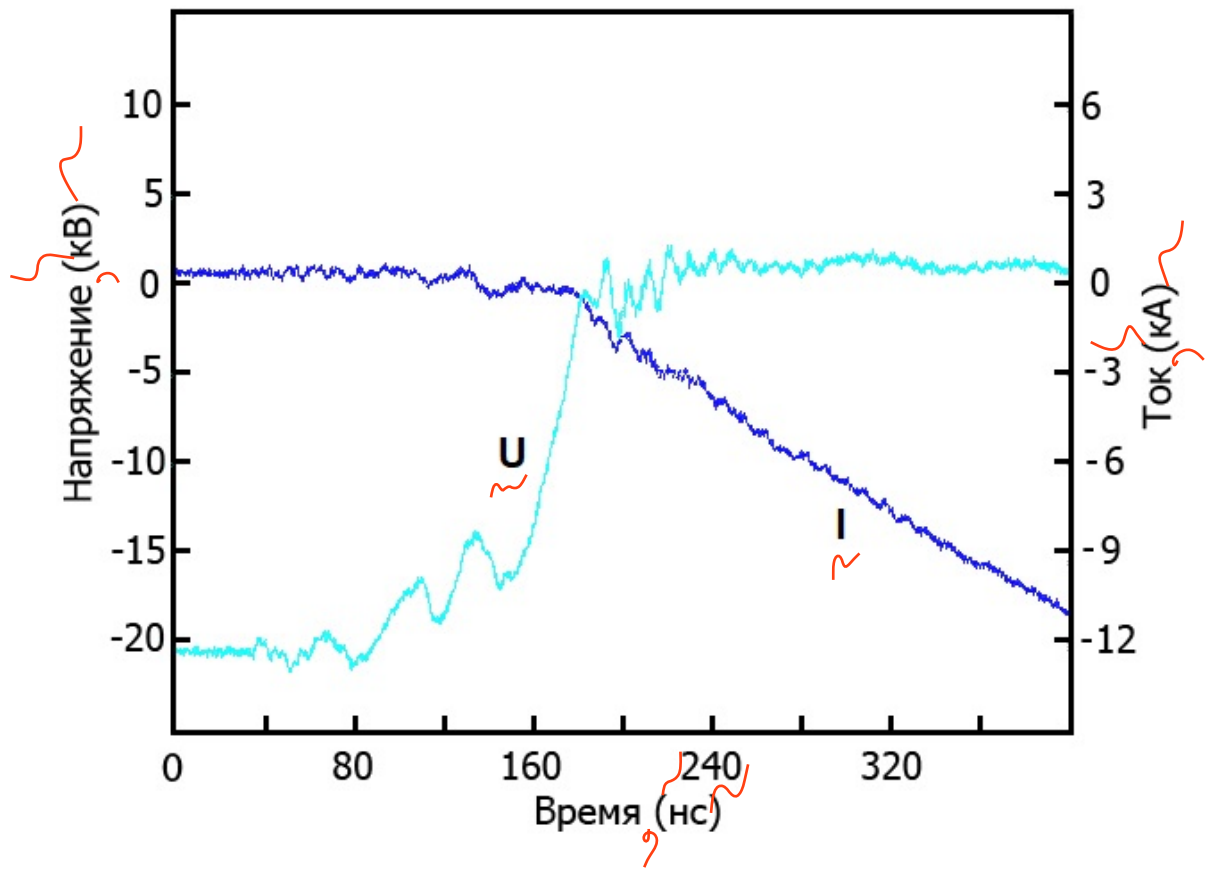


Рис. 8.

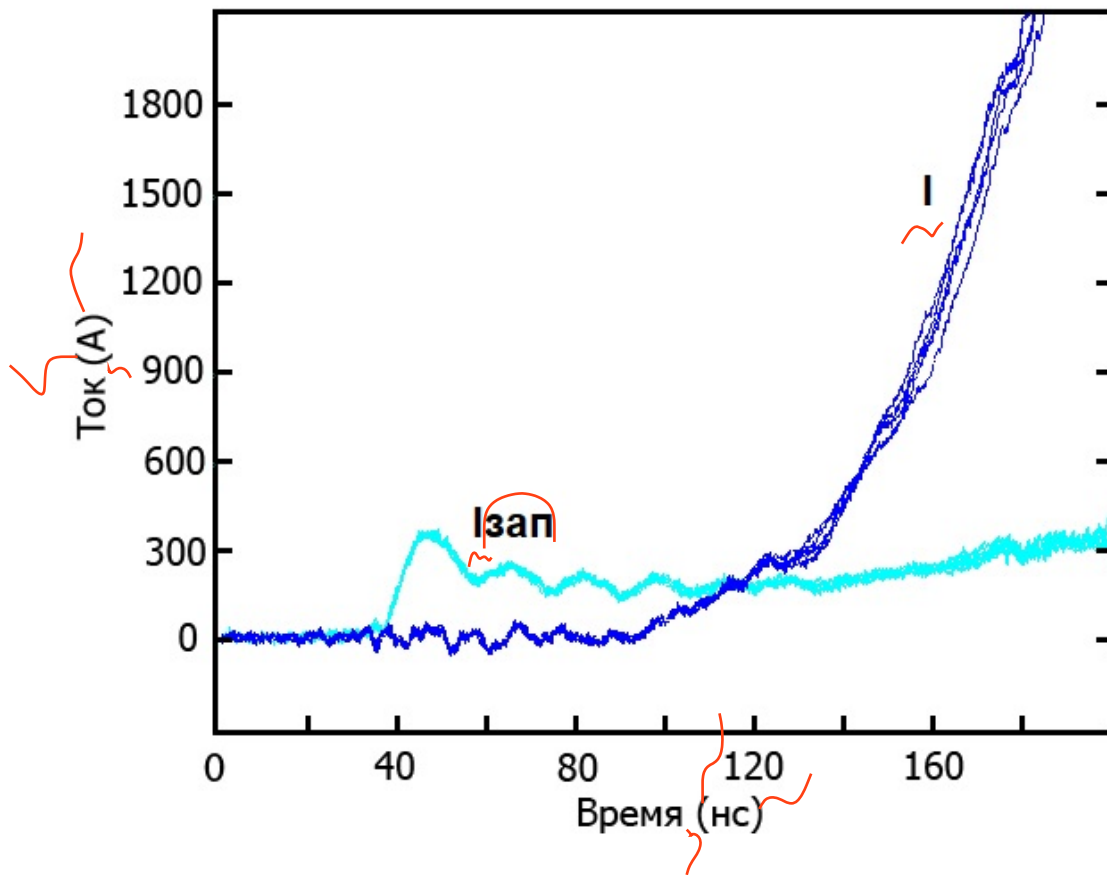


Рис.9.