

**ЭЛЕКТРОНИКА
И РАДИОТЕХНИКА**

УДК. 621.387.3

**ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСОВ С УДВОЕНИЕМ
НАПРЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТОЙ ДО 300 кГц**

©2025 г. П. А. Бохан^а, П. П. Гугин^{а,*}, Д. Э. Закревский^а, М. А. Лаврухин^а

^аИнститут физики полупроводников им. А.В. Ржанова

Сибирского отделения Российской академии наук

Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

**e-mail: gugin@isp.nsc.ru*

Поступила в редакцию 24.03.2025 г.

После доработки 24.04.2025 г.

Принята к публикации 21.05.2025 г.

Показана возможность использования составного газоразрядного прибора на основе комбинации капиллярного разряда и плазменного катода (эптрона) в генераторе импульсов амплитудой до 46 кВ при частоте повторения импульсов до 300 кГц. В схеме использованы два эптрона: в составе удвоителя напряжения и в качестве выходного наносекундного коммутатора. Достигнута эффективность перезарядки удвоителя 85 %.

В различных областях науки и реального производства, таких как, например, ускорители элементарных частиц [1, 2], термоядерные исследования [3], радиолокация [4], медицина [5], очистка воды [6] и воздуха [7], обработка материалов [8] и др. [9], востребованы элементы и устройства силовой электроники, генерирующие мощные высоковольтные импульсы. Для большинства научных исследований обычно нужны мощные, порядка ГВт, но одиночные импульсы. Для промышленных и медицинских задач чаще требуются импульсы средних энергий, но с повышенной частотой повторения – вплоть до десятков и сотен кГц. Например, для стерилизации продуктов или очистки воды требуется накопить определенную дозу энергии на единицу веса [10]. Очевидно, увеличивая частоту повторения импульсов, можно значительно

ускорить процесс обработки материала. Аналогично повышение частоты повторения импульсов в задачах диссоциации сложных газообразных химических соединений, нейтрализации и обезвреживания экологически вредных летучих соединений (газов) приведет к повышению производительности [11].

Для разработки и исследования лазеров, особенно высокого давления, актуальной является равномерность распределения плазмы по объему активного элемента, что достигается созданием предимпульсной концентрации электронов [12]. Для этого используются различные способы предыонизации [13, 14]. При увеличении частоты следования импульсов с фронтами напряжения в единицы (и менее) наносекунд можно обеспечить объемный характер протекания тока во временном диапазоне, меньшем времени развития искровых процессов при повышенных давлениях, вплоть до атмосферного, без принудительной предыонизации разрядного промежутка [15, 16].

Таким образом, для технологических применений ключевыми параметрами являются скорость и равномерность введения в рабочую среду энергии заданного диапазона, а также надежность и эффективность генератора высоковольтных импульсов. Известно большое количество схемотехнических решений для повышения напряжения импульса питания: импульсные трансформаторы, различные умножители и схемы компрессии импульсов [17]. При этом существующая элементная база имеет ряд критических недостатков. Полупроводниковые элементы, способные обеспечить высокую частоту повторения, имеют низкое рабочее напряжение, что приводит к необходимости использовать большое количество элементов в параллельно-последовательных сборках, а это, в свою очередь, снижает надежность и увеличивает сложность и стоимость генератора. Газоразрядные коммутаторы не способны работать на высоких частотах повторения, они имеют срок службы, не превышающий сотен часов. Таким образом, разработка высоковольтных силовых коммутационных устройств с нано- и субнаносекундным переключением, способных функционировать при частотах следования импульсов $f \geq 100$ кГц, для питания мощных электрофизических устройств, импульсных источников ВЧ-колебаний, газоразрядных высокоэнергетических устройств диссоциации газообразных химических соединений, нейтрализации и обезвреживания экологически вредных летучих соединений, в том числе радиоактивных, и газоздушных технологических выбросов, газоразрядных лазеров и т.д., является актуальной задачей.

В настоящей работе рассмотрена возможность применения эйтрона – коммутационного устройства с плазменным катодом, функционирующего при развитии тока в капилляре [18]. Особенностью работы эйтрона является генерация большого количества электронов в холодном

катодном узле, при этом за счет затрудненного развития тока в капилляре обеспечиваются высокое время задержки развития пробоя (около сотен нс) и быстрая рекомбинация плазмы (примерно за 1 мкс) в капилляре после прохождения тока. Особенности конструкции эйтрона позволяют использовать его при частоте повторения $f \approx 100$ кГц при напряжении в десятки кВ [19, 20]. Использование в качестве плазменного катода “открытого” разряда обеспечивает ресурс катода эйтрона не хуже 10^{11} импульсов без следов деградации [21, 22] благодаря тому, что основным механизмом эмиссии электронов является фотоэмиссия под действием излучения тяжелых частиц в самом разряде [22].

В работе [15] продемонстрировано функционирование и исследованы особенности объемного разряда в гелии при высоком давлении при частоте до $f \approx 100$ кГц в разрядной структуре с электродами с ограниченной проводимостью. Дальнейшим развитием работы стало исследование в аналогичных условиях барьерного и “открытого” разрядов атмосферного давления. Это потребовало повышения напряжения питания. Было предложено использовать схему удвоения напряжения с изменением полярности при перезарядке емкостей [23] с эйтроном в качестве коммутатора. Данная схема умножения напряжения наименее требовательна к динамическим характеристикам коммутатора, также возможно конструктивное исполнение с сохранением низкоиндуктивного разрядного контура без использования дополнительных звеньев компрессии.

В настоящей статье рассматривается функционирование одной ступени удвоителя, хотя джиттер пробоя эйтрона на высоких частотах позволяет построение на его основе умножителей напряжения с несколькими ступенями. Кроме того, схема предполагает использование высоковольтного коммутатора, который после перезарядки емкостей замыкает цепь нагрузки. В качестве коммутатора в работе использовано аналогичное устройство – эйтрон, который позволяет получать как на активной нагрузке, так и на разрядной ячейке для исследования барьерного разряда атмосферного давления фронт напряжения длительностью примерно 1.5 нс.

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из первичного генератора высоковольтных импульсов и удвоителя напряжения; первичный генератор – из восьми параллельно включенных транзисторов IRG4PH50U, емкости C_1 и трансформатора Tr_1 , который имеет один виток в первичной обмотке и 30 – во вторичной. Транзисторы управляются индивидуальными драйверами $Dr_1 - Dr_8$, которые синхронизованы с точностью до 3 нс с учетом разброса параметров элементов. Питание транзисторов осуществляется от регулируемого источника $U_0 = 0-900$ В. Для уменьшения конструктивной индуктивности генератора емкость C_1 составлена из набора высоковольтных конденсаторов поверхностного монтажа номиналом 100 нФ каждый и

распределена равномерно между транзисторами, которые, в свою очередь, окружают корпус трансформатора. Трансформатор выполнен на трех кольцевых сердечниках типоразмера $R84 \times 57 \times 17$ с начальной проницаемостью $\mu = 2500$. Вторичная обмотка состоит из двух встречно-параллельных секций для уменьшения индуктивности рассеяния и расположения высоковольтных выводов по диаметру колец. Корпус трансформатора выполнен из оргстекла и заполнен трансформаторным маслом. Первичная обмотка выполнена из медной фольги толщиной 100 мкм в виде кожуха на корпусе трансформатора. Таким образом, индуктивность рассеяния, приведенная ко вторичной обмотке, составила менее 10 мкГн. Индуктивность L_1 задавала требуемое время зарядки пары емкостей удвоителя, которое составляло 400–600 нс и определялось задержкой развития пробоя эитрона EP_1 , которую можно было регулировать путем изменения давления гелия внутри него, равного $p = 4\text{--}8$ Торр, в зависимости от напряжения. Диод VD_1 (сборка из 60 диодов SF38G с временем обратного восстановления $T_{rr} = 35$ нс) запирает напряжение на этих емкостях, не давая им разряжаться до срабатывания EP_1 .

Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Эитроны $EP_{1,2}$ (рис. 2) состояли из полого катода 1, выполненного из титановой трубки длиной 85 мм и внутренним диаметром 26 мм, к боковой поверхности которой был присоединен целевой капилляр 3 сечением 0.15×15 мм² и длиной 60 мм, выточенный в кварцевой пластинке. Анод 4 выполнен из фольги нержавеющей стали. На внешней поверхности капилляра расположен медный экран 2, гальванически связанный с потенциалом катода. Установка экрана не влияла на процесс рекомбинации плазмы в капиллярной канале и обеспечивала субмикросекундное время рекомбинации плазмы после прохождения импульса тока. Давление рабочего газа в EP_1 , равное $p = 4\text{--}8$ Торр, устанавливалось в зависимости от напряжения и частоты повторения импульсов.

Рис. 2. Конструкция эитрона.

Диод VD_2 (сборка из 60 карбидокремниевых диодов C4D05120E с $T_{rr} = 0$) притягивал к нулевому потенциалу напряжение U_2 в точке В (рис.1) во время процесса заряда. После пробоя первого эитрона EP_1 через индуктивность L_2 происходила перезарядка емкостей до обратного напряжения той же амплитуды. В результате этого в точке В (рис. 1) генерировалось удвоенное относительно U_1 в точке А (рис. 1) напряжение отрицательной полярности, которое прикладывалось к катоду второго эитрона EP_2 . Длительность этого процесса задавалась индуктивностью L_2 , которая изменялась в пределах примерно от 1 мкГн (собственная индуктивность перезарядного контура) до 40 мкГн. Давление рабочего газа в EP_2 , $p = 12\text{--}20$

Торр, устанавливалось в зависимости от напряжения и частоты повторения и подбиралось каждый раз таким образом, что пробой происходил в момент окончания перезарядки в максимуме напряжения.

Генератор работал в режиме цуга с заполнением 20 импульсами с частотой повторения 100 кГц. Частота цуга составляла 10 Гц. Такой режим был выбран, чтобы избежать существенного нагрева всех элементов. В частности, температура транзисторов не превышала 50 °С при естественном охлаждении, температура эптонов достигала примерно 44 °С. Эптоны функционировали в отпаянном режиме, но подводящие трубки газовакуумной магистрали имели существенный объем. В случае нагрева изменяется концентрация рабочего газа в разрядной зоне эптона из-за его вытеснения в более холодную магистраль, что заметно меняет функциональные параметры коммутатора [21]. Эксперименты показали, что к третьему импульсу цуга характеристики обоих эптонов полностью стабилизировались, и осциллограммы последующих импульсов были идентичными, что говорит о возможности экстраполяции полученных результатов на режим регулярных импульсов.

На рис. 3 приведены типичные осциллограммы напряжений $U_{1,2}$ в точках А, В (рис. 1) при $L_2 = 15$ мкГн. В данном случае эптон EP_2 был заменен нагрузочным сопротивлением с $R = 2$ кОм. Давление гелия в EP_1 $p = 4$ Торр, частота повторения импульсов $f = 100$ кГц. Измерения проводились специально разработанными резистивными делителями напряжения на основе сопротивлений ТВО-0.5 [24, 25]. Для регистрации электрических сигналов использовался цифровой осциллограф Tectronix с полосой пропускания 1 ГГц и частотой дискретизации до 5 ГГц.

Рис. 3. Осциллограммы работы удвоителя в точках А, В (рис. 1)

Увеличение индуктивности L_2 приводит к уменьшению как стартовых потерь, так и потерь на проводимость. На графиках (рис. 4) видно, что при $L_2 = 15$ мкГн обеспечивается приемлемое для устойчивой работы EP_2 время перезарядки (около 160 нс), а эффективность, вычисленная из отношения энергии, запасенной в конденсаторах $C_{2,3}$, которые в процессе зарядки включены параллельно, и энергии в них же после удвоения, когда $C_{2,3}$ включены последовательно относительно точки В (рис. 1), достигает 83%. При увеличении L_2 до 40 мкГн эффективность увеличивается незначительно, тогда как время перезарядки растет почти вдвое. Кроме того, на процесс перезарядки влияют предыдущие ступени схемы: при изменении полярности вновь открывается диод VD_1 и через него происходит подпитка конденсатора C_2 , что снижает напряжение перезарядки тем сильнее, чем меньше отношение индуктивностей L_2/L_1 .

Рис. 4. Влияние L_2 на эффективность и время перезарядки $C_{3,4}$

На рис. 5а показана общая картина функционирования обоих энтронов при использовании активной нагрузки $R_L = 150$ Ом с собственной емкостью 50 пФ (характерная емкость ячейки барьерного разряда, аналогичная по габаритам, использованной в работе [15]). Видно, что энтрон EP_2 срабатывает в момент достижения амплитуды напряжения U_2 в точке В (рис. 1). Длительность фронта напряжения на нагрузке при этом составляет примерно 1.5 нс (рис. 5б). Однако собственная емкость нагрузки в сочетании с низкой индуктивностью разрядной цепи приводит на данный момент к низкой эффективности коммутации энтрона EP_2 , но при работе на чисто активную или активно-индуктивную нагрузку с низкой собственной емкостью при фронте на уровне 1 нс эффективность коммутации энтрона может превышать 80% при определенных номинале нагрузки и приложенном напряжении.

Рис. 5. а – Осциллограммы работы генератора импульсов на нагрузку $R_L = 150$ Ом...

В настоящей работе были проведены эксперименты по определению максимальной частоты следования импульсов. Максимальная частота работы транзисторного генератора составляла 300 кГц. При снижении давления гелия в EP_1 до $p = 3$ Торр, а в EP_2 – до $p = 8$ Торр обеспечивается стабильное функционирование обоих устройств на частоте $f = 300$ кГц при напряжении U_1 в точке А (рис. 1) свыше 20 кВ, а в точке В (рис. 1) было достигнуто напряжение до $U_2 \approx 46$ кВ (рис. 6).

Рис. 6. Осциллограмма в точке А (рис. 1) при частоте повторения импульсов 300 кГц.

В данной работе продемонстрирована возможность эффективной работы газоразрядного устройства на основе развития тока при субнаносекундном пробое капиллярной разрядной структуры с плазменным катодом при частоте повторения импульсов до 300 кГц в схеме удвоения напряжения с перезарядкой емкостей и при амплитуде напряжения до 46 кВ. Эффективность перезарядки в зависимости от условий может достигать 85%.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках государственного задания FWGW-2025-0019 и при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 24-19-00037 (<https://rscf.ru/project/24-19-00037/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sokovnin S.Y., Balezin M.E. // Radiat. Phys. Chem. 2018. V. 144 P. 265. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.08.023>*

2. *Smirnov A., Ivanov E., Pronikov A., Kutsaev S.* // Electronics. 2025. V. 14 № 3 P. 535.
<https://doi.org/10.3390/electronics14030535>
3. *Conti F., Valenzuela J.C., Fadeev V., Aybar N., Reisman D.B., Williams A., Collins IV G., Narkis J., Ross M.P., Beg F.N.* // Phys. Rev. Accel. Beams. 2020. V. 23 № 9 P. 090401.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.23.090401>
4. *Paul A.K., Giridhar A.V., Rai K.K., Kirubakaran A.* // 1st International Conference on Power Electronics and Energy (ICPEE). Bhubaneswar, India, 2021. P. 1.
<https://doi.org/10.1109/ICPEE50452.2021.9358689>
5. *Abadi M.R.Q.R., Marzebali M.H., Abolghasemi V., Anisi M.H.* //IEEE Access. 2022 V. 10 P. 64933. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3184015>
6. *Guo X., Zheng D., Blaabjerg F.* // IEEE Trans. Power Electron. 2020. V. 35. №. 10. P. 10285.
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2976145>
7. *Beckers F.J.C.M., Hoebe W.F.L.M., Huiskamp T., Pemen A.J.M., Van Heesch E.J.M.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. V. 40. № 10. P. 2920. <https://doi.org/10.1109/TPS.2013.2275035>
8. *Chanturia V.A., Bunin I.Z., Ryazantseva M.V., Chanturia E.L., Khabarova I.A., Koporulina E.V., Anashkina N.E.* // J. Min. Sci. 2018. V. 53. P. 718. <https://doi.org/10.1134/S1062739117042704>
9. *Akiyama H., Sakugawa T., Namihira T., Takaki K., Minamitani Y., Shimomura N.* // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2007. V. 14. №. 5. P. 1051. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2007.4339465>
10. *Arshad R.N., Abdul-Malek Z., Munir A., Buntat Z., Ahmad M. H., Jusoh Y. M., Bekhit A.E.-D., Roobab U., Manzoor M.F., Aadil R.M.* // Trends Food Sci. Technol. 2020. V. 104. P. 1.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.07.008>
11. *Takaki K., Takahashi K., Hayashi N., Wang D., Ohshima T.* // Rev. Mod. Plasma Phys. 2021 V. 5 № 1 P. 12, <https://doi.org/10.1007/s41614-021-00059-9>
12. *Осунгов В.В.* // УФН. 2000. Т. 170. № 3. С. 225. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0170.200003a.0225>
13. *Сатов Ю.А., Шарков Б.Ю., Алексеев Н.Н., Шумиуров А.В., Балабаев А.Н., Савин С.М., Белокуров А.Д., Хрисанов И.А., Макаров К.Н.* // ПТЭ. 2012. № 3. С. 107.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=17726205>
<https://doi.org/10.1134/S0020441212020108>
14. *Месяц Г.А., Яландин М.И.* // УФН. 2019. V. 189. № 7. P. 747.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.06.038354>
15. *Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М.А.* // Письма в ЖТФ. 2024. Т. 50. № 19. С. 9. <https://doi.org/10.61011/PJTF.2024.19.58648.19992>

16. *Bokhan P.A., Gugin P.P., Lavrukhin M.A., Zakrevsky D.E., Schweigert I.V.* // Phys. Plasma. 2023. V. 30. № 10. P. 103506. <https://doi.org/10.1063/5.0164607>
17. *Zhuge Y., Liang J., Fu M., Long T., Wang H.* // IEEE Open J. Power Electron. 2024. V. 5 P. 1. <https://doi.org/10.1109/OJPEL.2023.3340220>
18. *Bokhan P.A., Gugin P.P., Lavrukhin M.A., Zakrevsky D.E., Schweigert I.V., Alexandrov A.L.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2020. V. 29. № 8. P. 084002. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab9d90>
19. *Bokhan P.A., Gugin P.P., Lavrukhin M.A., Zakrevsky D.E.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. V. 51. № 36. P. 364001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aad351>
20. *Lavrukhin M.A., Bokhan P.A., Gugin P.P., Zakrevsky Dm.E.* // Opt. Laser Technol. 2024. V. 170. P. 110174. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110174>
21. *Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М.А.* // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП – 2018. Новосибирск: Россия. С. 103.
22. *Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М.А.* // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 10. С. 50. <https://elibrary.ru/item.asp?id=24196212>
<https://doi.org/10.1134/S1063784215100096>
23. *Fitch R.A., Howell V.T.S.* // Proceed. of the Institution of Electrical Engineers., IET Digital Library, 1964. V. 111. №. 4. P. 849. <https://doi.org/10.1049/piee.1964.0139>
24. *Белкин В.С., Шульженко Г.И.* Формирователи мощных наносекундных и пикосекундных импульсов на полупроводниковой элементной базе. Препринт ИЯФ им. Г. И. Будкера.- Новосибирск, 1991. - 35 с.
25. *Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М.А.* // ПТЭ. 2018. № 4. С. 31. <https://doi.org/10.1134/S0032816218030205>.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Рис. 2. Конструкция эптона: 1 – катод, 2 – экран капилляра, 3 – капилляр, 4 – анод эптона.

Рис. 3. Осциллограммы работы удвоителя в точках А, В (рис. 1).

Рис. 4. Влияние L_2 на эффективность и время перезарядки $C_{3,4}$.

Рис. 5. а – Осциллограммы работы генератора импульсов на нагрузку $R_L = 150$ Ом с собственной емкостью 50 пФ в точках А, В, С (рис. 1); б – фронт импульса напряжения на нагрузке в точке С (рис. 1).

Рис. 6. Осциллограмма напряжения U_1 в точке А (рис. 1) при частоте повторения импульсов 300 кГц.

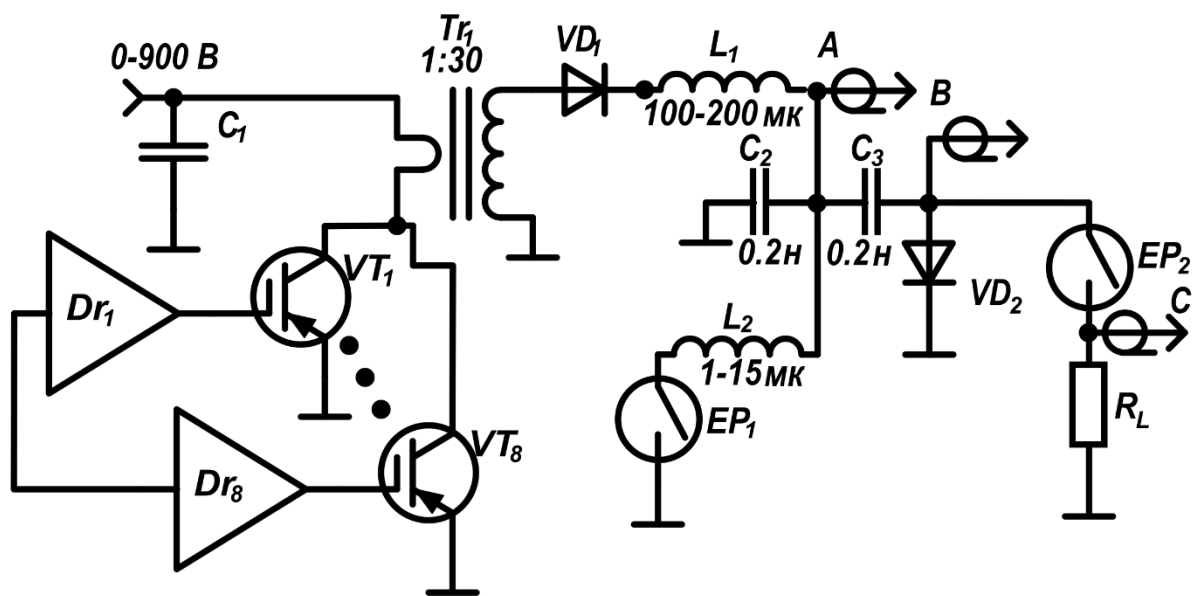


Рис.1.

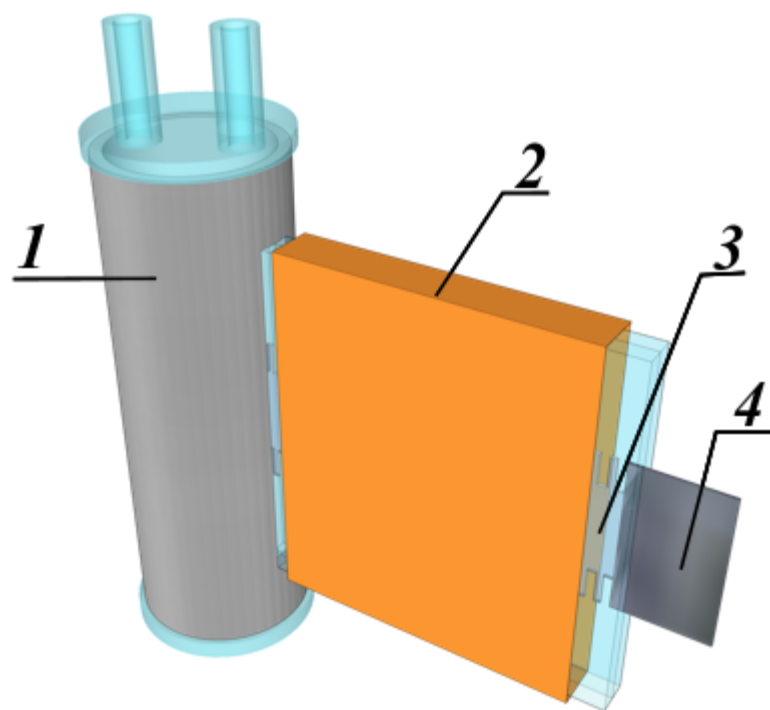


Рис. 2

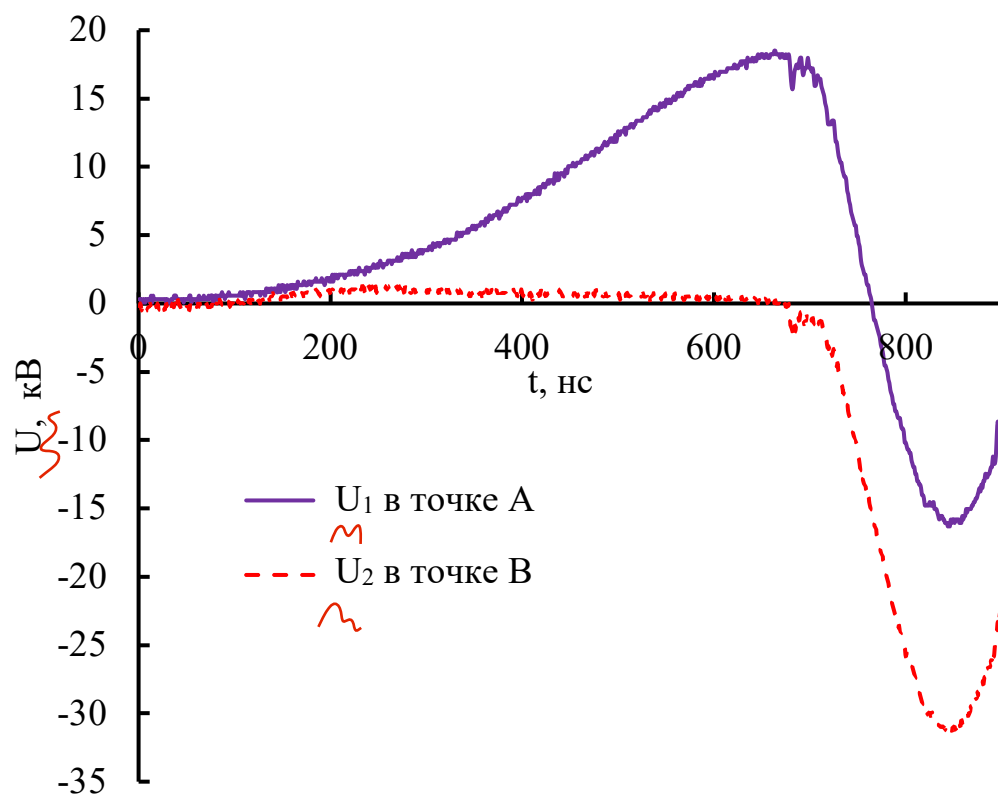


Рис. 3.

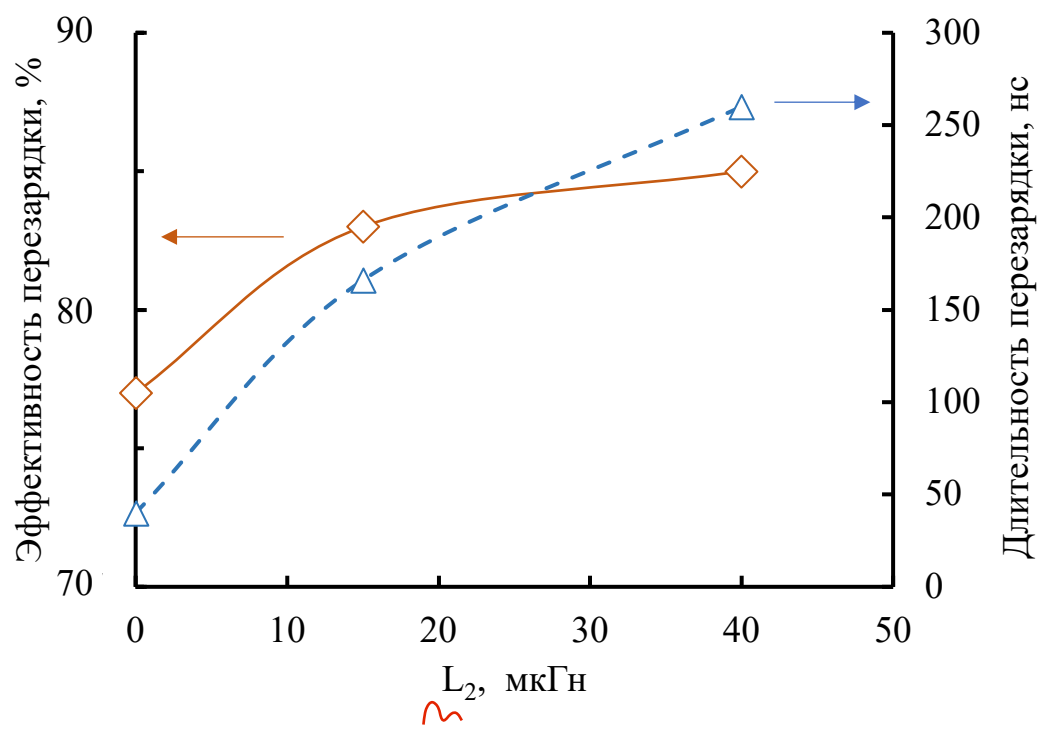
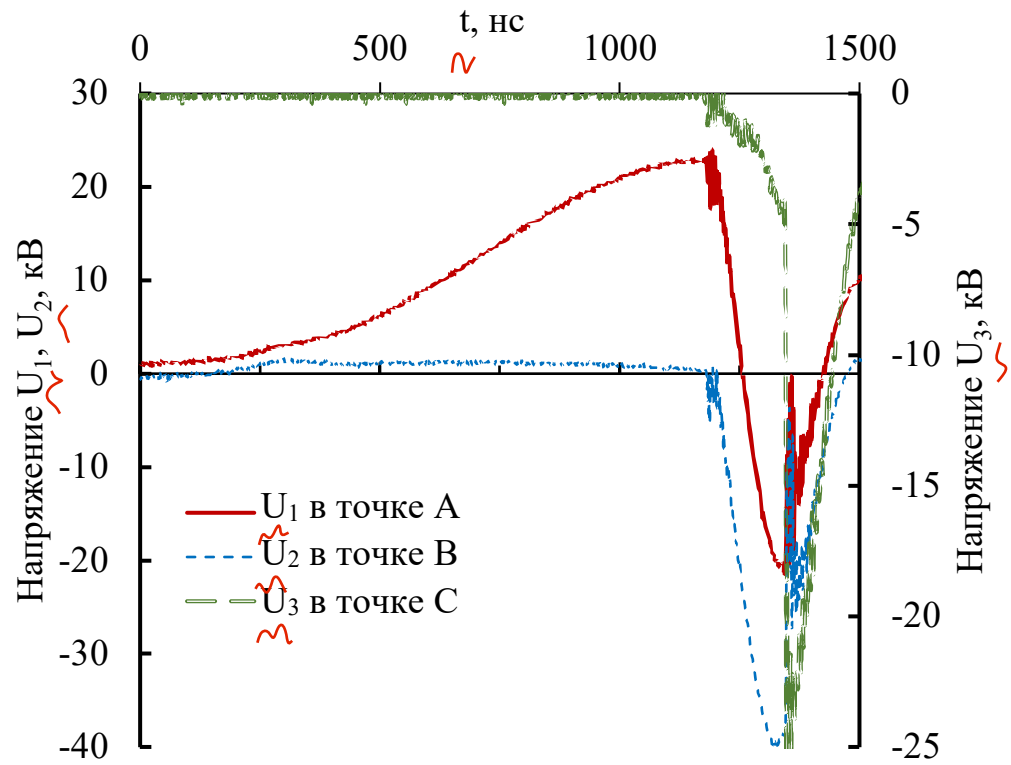
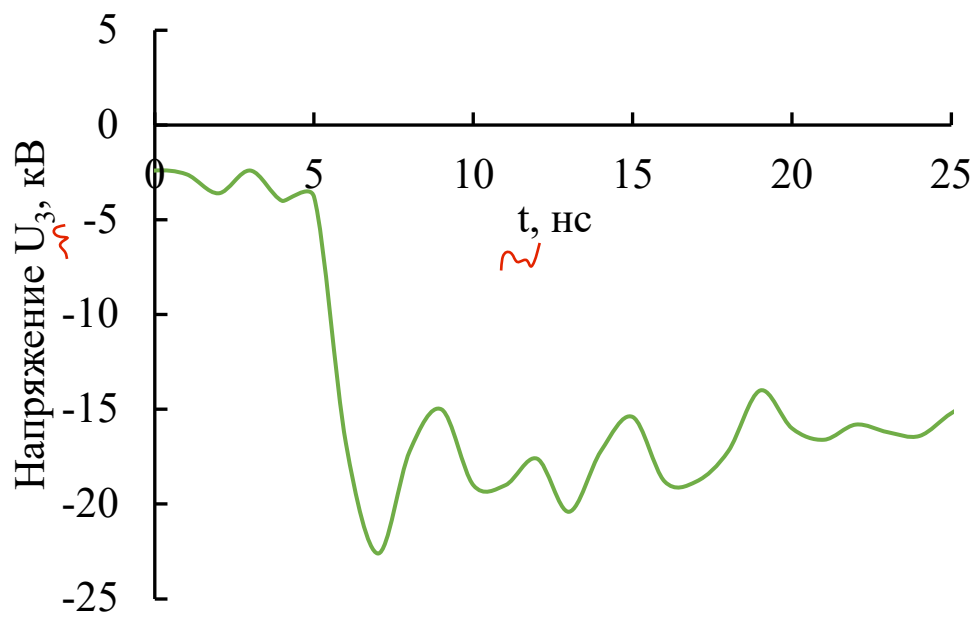


Рис. 4.



(a)



(б)

Рис. 5

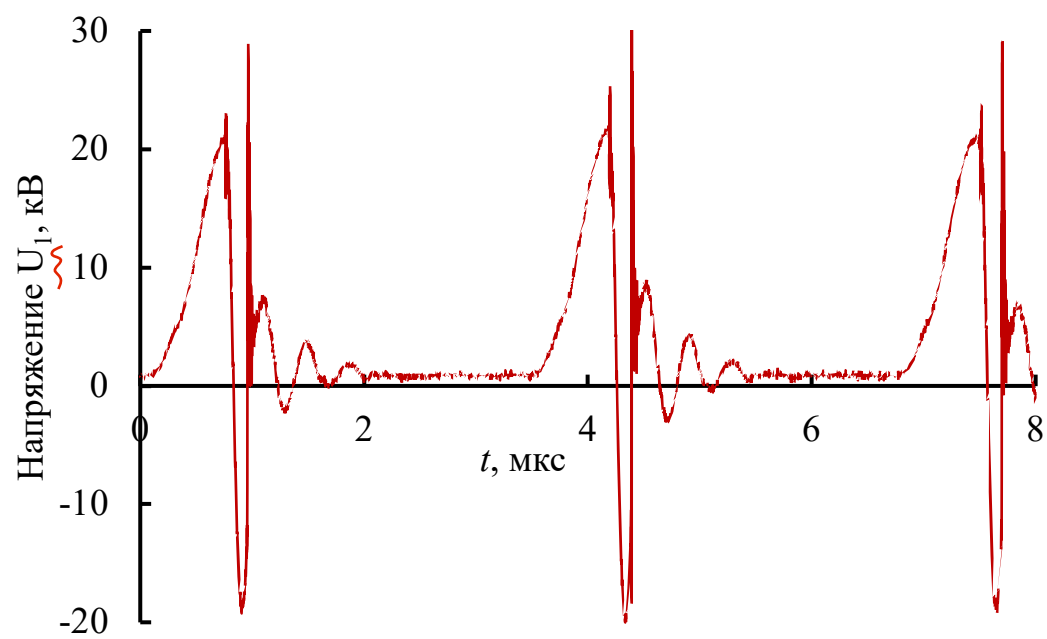


Рис. 6.