

**ЭЛЕКТРОНИКА
И РАДИОТЕХНИКА**

УДК 621.384.643

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ**

©2025 г. М. П. Калаев^а, А. М. Телегин^{а, *}

^аСамарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева

Россия, 443086, Самара, Московское ш., 34

*e-mail: talex85@mail.ru

Поступила в редакцию 11.02.2025 г.

После доработки 21.04.2025 г.

Принята к публикации 12.05.2025 г.

Рассмотрены принципы построения высоковольтного источника с выходным напряжением 50–00 кВ питания линейного электростатического ускорителя пылевых частиц, который используется для моделирования воздействия микрометеороидов и частиц космического мусора на элементы конструкции космических аппаратов. На основе компьютерного моделирования выбраны основные электронные компоненты, входящие в схему высоковольтного генератора, проведено испытание в составе ускорителя. Рассчитано влияние пульсаций выходного напряжения на ускорение пылевой частицы с размерами 1–10 мкм в тракте, состоящем из 11 полых цилиндрических электродов с суммарным ускоряющим напряжением 100 кВ.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для имитации высокоскоростного воздействия на элементы конструкции космического аппарата используются ускорители пылевых частиц (микрометеороидов и частиц космического мусора) [1–9]. Конструирование таких ускорителей является сложной и наукоемкой задачей, при этом разработчики должны увеличивать функционал ускорителей и автоматизировать процесс проведения эксперимента. Одной из основных сложностей при проектировании ускорителей является создание устройств формирования высоких напряжений (50–200 кВ и выше) в лабораторных условиях. Источники высокого напряжения для питания ускорителей частиц могут быть различных типов в зависимости от требований к стабильности, мощности и конструкции системы (табл. 1).

Таблица 1. Некоторые виды источников высокого напряжения

Наименование	Принцип действия	Преимущества	Недостатки	Применение
Трансформаторы с выпрямителями [13]	Высоковольтные трансформаторы используются для повышения напряжения до необходимого уровня с последующим выпрямлением	Простота конструкции	Высокие требования к рабочим напряжениям диодов и конденсаторов выпрямителя	Подходят для систем с относительно низким выходным напряжением (обычно до 30 кВ)
Каскадные генераторы (генераторы Кокрофта-Уолтона) [10]	Многоступенчатая схема из диодов и конденсаторов, которая умножает входное напряжение	Простота конструкции, отсутствие движущихся частей	Ограниченные мощность и стабильность напряжения	Используются в маломощных ускорителях или в системах, где важна компактность
Генераторы Ван де Граафа [11]	Электростатический генератор, использующий движущуюся ленту для накопления заряда	Высокая стабильность напряжения, низкий уровень шума	Ограниченная мощность, сложность конструкции, наличие движущихся частей	Используются в ускорителях с предельно высокими напряжениями (с энергией более 1 МэВ)
Резонансные трансформаторы (Тесла-трансформаторы) [12]	Используют резонансные явления для генерации высокого напряжения.	Высокое напряжение при относительно простой конструкции	Сложность управления и стабилизации напряжения	Экспериментальные установки или специализированные ускорители

Выбор конкретного типа источника зависит от задач ускорителя, бюджета и технических требований: мощности, стабильности напряжения, компактности, надежности.

Одним из практически применимых методов формирования высокого напряжения в лабораторных условиях является комбинация воздушного трансформатора, возбуждаемого на высокой частоте (20–50 кГц), и многоступенчатого умножителя на диодах и конденсаторах (рис. 1) [14]. Преимуществом такого метода являются возможность регулирования выходного напряжения, сниженные требования на предельные рабочие напряжения входящих в состав элементов (диодов и конденсаторов), относительная простота и надежность. Недостатки: невысокий КПД из-за падения напряжения на диодных сборках, относительно высокий коэффициент пульсации выходного напряжения.

Рис. 1. Фотография высоковольтного умножителя напряжения ускорителя (Самарский университет)

Первый недостаток для линейного электростатического ускорителя (ЛЭСУ) (рис. 2) не является критичным, поскольку сопротивление нагрузки ЛЭСУ обычно велико (порядка 10^9 Ом), и нагрузка фактически определяется токами утечки высоковольтных изоляторов и стеканием заряда.

Второй параметр оказывает влияние на точность измерения напряжения ЛЭСУ, а также приводит к изменению ускоряющего электрического поля между дрейфовыми трубками ЛЭСУ непосредственно во время пролета частицы, что вносит погрешность в приобретаемое ей ускорение.

Рис. 2. Фото линейного электростатического ускорителя (Самарский университет)

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ УСКОРЕНИЯ ТВЕРДОЙ ЧАСТИЦЫ В ЛЭСУ В УСЛОВИЯХ ПУЛЬСАЦИИ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Для определения влияния переменной составляющей высоковольтного источника на разброс скоростей частиц на выходе ЛЭСУ было проведено численное моделирование. Номинальное напряжение питания высоковольтного источника $U_{HV}=100$ кВ. ЛЭСУ состоит из 11 трубок, образующих $N=10$ ускоряющих промежутков, включенных между звеньями резистивного делителя. Таким образом, разность напряжений между соседними трубками составляет $U_{HV}/N=10$ кВ. Расстояние между трубками составляет $L_1=10$ мм, длина каждой трубки $L_2=90$ мм.

Когда частица движется в промежутках между трубками, ее ускорение описывается выражениями

$$v(t) = v_0 + \frac{Q}{m}Et, \quad S(t) = S_0 + v_0t + \frac{Q}{2m}Et^2, \quad E = \frac{U}{d},$$

где v_0 – начальная скорость частицы (200–2000 м/с), Q – заряд частицы, m – масса частицы, Q/m [Кл/кг] – отношение заряда частицы к ее массе, E – напряженность электрического поля, S_0 – начальная координата частицы, U – напряжение между соседними электродами (10 кВ), d – расстояние между электродами. Когда частица движется внутри цилиндрических электродов, происходит экранирование от внешнего электрического поля, поэтому ее скорость и ускорение остаются неизменными. Более детально процесс ускорения частицы описан в работах [6–9].

Напряжение на выходе генератора можно описать выражением

$$U = U_0 + A \sin(2\pi f t + \varphi_0),$$

где U_0 – номинальное напряжение высоковольтного источника (50–200 кВ), A – амплитуда переменной составляющей ускоряющего напряжения, которая является

нежелательной, $f = 20$ кГц – частота генератора, φ_0 – фаза переменной составляющей высоковольтного источника в момент влета частицы в ЛЭСУ ($0-2\pi$).

При моделировании были заданы различные комбинации V , Q/m , φ_0 . При этом на ускорителе высокоскоростных микрочастиц Самарского университета [14] было экспериментально установлено, что параметр Q/m и скорость частицы на выходе инжектора подчиняются распределению, показанному на рис. 3, которое хорошо аппроксимируется выражением вида

$$\frac{Q}{m} = 3.9 \cdot 10^{-6} V^2.$$

По этой причине количество переменных при моделировании сокращается до двух: скорости частицы и фазы пульсирующего напряжения.

Рис. 3. Зависимость Q/m от скорости частицы на выходе ЛЭСУ

В зависимости от фазы φ_0 пульсирующего напряжения источника питания при влете частицы в ЛЭСУ может наблюдаться как ее замедление, так и ускорение относительно частицы, двигающейся в стабильном ускоряющем электрическом поле. Наглядно это характеризуется графиком распределения скоростей внутри тракта ЛЭСУ, показанным на рис. 4, при начальной скорости частицы 500 м/с. Линия 1 соответствует движению частицы в стабильном электрическом поле. Линии 2 и 3 построены при наличии пульсирующей составляющей с амплитудой 5% от номинального значения и фазами $\pi/3$ и $4\pi/3$. На рис. 4 наложено схематичное изображение системы из 11 цилиндрических электродов, формирующих ускоряющие потенциалы в своих зазорах.

Рис. 4. Зависимость скорости частицы в ЛЭСУ от ее координаты при разных начальных фазах пульсации источника. Внизу показана система ускоряющих трубок ЛЭСУ

Следует отметить, что отклонение скорости частицы в результате пульсации ускоряющего напряжения не нарушает работу ускорителя, поскольку измерительные линейки на выходе ЛЭСУ в любом случае позволяют точно измерить ее скорость [6, 7]. При этом оценка массы ускоряемой частицы производится согласно выражению [15]

$$m = \frac{2UQ}{(V_{out}^2 - V_{in}^2)},$$

где m – масса частицы, U – напряжение, Q – заряд частицы, V_{in} – скорость на входе ЛЭСУ, V_{out} – скорость на выходе ЛЭСУ.

Согласно представленному выше выражению, пульсация ускоряющего напряжения приводят к пропорциональному увеличению погрешности определения массы частицы [16].

Путем циклической подстановки в математическую модель ускоряющего тракта скоростей частиц в диапазоне (300–2200 м/с) и фаз пульсации высоковольтного источника питания ($0-2\pi$) получено семейство характеристик с разбросом скоростей частиц на выходе ЛЭСУ в

процентах (рис. 5). Амплитуда пульсации при моделировании составляла 5%, частота пульсации равна 20 кГц. Шаг дифференцирования по времени 10^{-9} с. Программа написана на языке C# и оптимизирована под многопоточные вычисления.

Рис. 5. Зависимость относительного отклонения скорости частицы от скорости на выходе ЛЭСУ при пульсации высоковольтного напряжения с частотой 20 кГц

Согласно рис. 5, зависимость величины разброса от скоростей частиц при выбранных начальных условиях имеет случайный характер, однако в целом укладывается в диапазон $\pm(0.2-1.3)\%$. Если задаться допустимым максимальным разбросом скоростей в $\pm 0.5\%$, то можно указать допустимую для источника относительную амплитуду пульсации $A/U_0 = 1.5\%$

Аналогичное моделирование проведено при частоте пульсации 50 Гц (рис. 6).

Рис. 6. Зависимость относительного отклонения скорости частицы от скорости на выходе ЛЭСУ при пульсации высоковольтного напряжения с частотой 50 Гц

Согласно рис. 6, относительное отклонение скоростей частиц в этом случае имеет равномерное распределение, поскольку частица практически с любой начальной скоростью пролетает через ЛЭСУ за время, существенно меньшее периода колебания пульсации высоковольтного напряжения. Такой вариант возможен, если первичный источник питания резонансного генератора не обеспечивает достаточную фильтрацию частоты промышленной сети переменного тока 50 Гц.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ, НАГРУЗОЧНОЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЦЕПЕЙ

Для определения оптимальных параметров источника высоковольтного напряжения проведено его моделирование в симуляторе Microcap v12 (рис. 7). Схема формирования напряжения включает в себя генератор с резонансным контуром на выходе, умножитель напряжения по схеме Кокрофта–Уолтона, схему формирования линейного электростатического поля на основе резистивного делителя в вакуумном тракте ЛЭСУ, схему измерения высокого напряжения на основе преобразователя ток-напряжение на ОУ и микроконтроллера ESP32 на выходе.

Рис. 7. Схема формирования и измерения высоковольтного напряжения ЛЭСУ

Принцип работы источника следующий. Источник синусоидальных колебаний, выполненный на радиолампах (ГМИ-32), совместно с элементами C_1 и L_1 образует резонансный генератор, позволяющий получить напряжение от 1 до 20 кВ. Это напряжение подается на умножитель, собранный на конденсаторах C_2-C_{18} и диодах D_1-D_{18} . С выхода умножителя напряжение величиной порядка 100 кВ подается на модуль формирования электростатического поля на основе цилиндрических электродов и резистивного делителя

(резисторы R_1-R_{10}). Конденсаторы $C_{19}-C_{28}$ образуются за счет взаимной емкости между цилиндрическими электродами и имеют значение порядка 1 пФ, R_i – эквивалентное сопротивление высоковольтных изоляторов, через которое происходит утечка тока, а также стекание высоковольтного заряда по поверхности (коронный разряд), C_i – эквивалентная емкость высоковольтной платформы ускорителя относительно земли.

Специально для этого эксперимента разработан и собран высокоточный гальванически развязанный (по радиоканалу) цифровой измеритель среднего уровня высокого напряжения. Его особенностью является использование резистивного делителя ЛЭСУ в качестве верхнего плеча делителя в измерителе напряжения. Такой подход позволяет снизить суммарную нагрузку на высоковольтный источник, отказавшись от еще одного делителя напряжения (измерительного). Правый по схеме вывод высоковольтного делителя напряжения включен в цепь преобразователя ток–напряжение на основе элементов OP_1 , R_{13} . Напряжение на выходе OP_1 через фильтрующую цепочку $R_{15}-C_{31}$ подается через инвертирующий усилитель OP_2 на вход АЦП микроконтроллера ESP32, включающего в себя модуль беспроводной связи Bluetooth, позволяющий передавать измеренное напряжение в цифровую систему сбора информации ускорителя.

В данной схеме уровень пульсации источника питания зависит от емкости конденсаторов в умножителе напряжения, а также от сопротивления нагрузки, состоящего из параллельного включения высоковольтного делителя R_1-R_{10} , и сопротивления утечки R_i .

Прямой способ уменьшения пульсации напряжения заключается в применении конденсаторов большой емкости в умножителе. Однако такой подход не только увеличивает стоимость и габариты источника, но и приводит к риску образования мощного высоковольтного разряда в случае возникновения пробоя, способного повредить электронику ускорителя. Поэтому на практике целесообразно ограничить емкость конденсаторов умножителя на некотором оптимальном уровне. Для определения оптимальной емкости конденсаторов проведено моделирование для значений емкости 100, 220, 470, 2000 пФ и определена зависимость уровня пульсации и выходного напряжения от их номинала. Результаты моделирования приведены на рис. 8, 9.

Рис. 8. Зависимость амплитуды пульсации от емкости конденсаторов C_m умножителя напряжения

Рис. 9. Зависимость амплитуды пульсации от емкости конденсаторов C_m умножителя напряжения

Согласно результатам моделирования (рис. 8, 9), приемлемый уровень пульсации достигается уже при емкости конденсаторов умножителя $C=470$ пФ, однако увеличение емкости до 2000 пФ позволяет повысить выходное напряжение на 10%.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью численного моделирования движения твердой заряженной частицы в тракте электростатического ускорителя определено влияние пульсации высоковольтного источника на разброс скоростей на выходе ускорителя.

Проведено моделирование схемы формирования высокого напряжения, нагрузочной и измерительной цепей; определена зависимость амплитуды пульсации в нагрузке от емкости конденсаторов в умножителе напряжения источника питания. Полученные результаты позволяют повысить точность измерения массы частицы в ускорителе, что имеет значение для экспериментов с высокоскоростными частицами, а также для правильной работы динамической ускорительной секции в случае ее использования на выходе ЛЭСУ. Кроме этого, определение влияния емкости конденсаторов высоковольтного умножителя на уровень напряжения и пульсации на его выходе позволяет проектировать малогабаритные преобразователи напряжения с заданными параметрами для ускорительной техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ядренкин М.А., Фомичев В.П., Голышев А.А.* // ЖТФ. 2024. Т. 94. № 2. С. 197.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=60019962>
2. *Батуев С.П., Буркин В.В., Дьячковский А.С. и др.* // Физическая мезомеханика. 2024. Т. 27. № 1. С. 81. https://doi.org/10.55652/1683-805X_2024_27_1_81-91
3. *Нейман В.Ю.* // Электротехника. 2024. № 5. С. 14.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=67226558>
4. *Сухачев К.И., Ю.В. Аксенова* // Вестник молодых ученых и специалистов Самарского университета. 2022. № 1(20). С. 134. <https://vmuis.ru/smus/issue/download/555/425>
5. *Фадеев А.А., Шестаков И.Я., Ереско Т.Т.* // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева. 2016. Т. 17. № 4. С. 1077. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27670286>
6. *Telegin A.M.* // J. Commun. Technol. Electron. 2024. V. 69. P. 268.
<https://doi.org/10.1134/S1064226924700323>
7. *Телегин А.М., Пияков А.В.* // ПТЭ. 2017. № 6. С. 101.
<https://doi.org/10.7868/S0032816217060131>
8. *Калаев М.П., Родина А.В., Телегин А.М., Исмагилова Е.В.* // ПТЭ. 2023. № 6. С. 142.
<https://doi.org/10.31857/S0032816223060022>
9. *Семкин Н.Д., Пияков А.В., Видманов А.С., Телегин А.М.* // ПТЭ. 2017. № 1. С. 148.
<https://doi.org/10.7868/S0032816216060082>

10. *Giotis K., Svarnas P., Petrou K., Poupouzas M., Athanasopoulos D.K.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2022.V. 50. P. 2185. <https://doi.org/10.1109/TPS.2022.3176132>
11. *Khalid R., Shaheen S., Aqeel-Ur-Rehman, Javed A.* // 2018 International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET), Islamabad, Pakistan. 2018. P. 1. <https://doi.org/10.1109/PGSRET.2018.8685983>
12. *Быковский А.А.* // Новые вызовы новой науки: опыт теоретического и эмпирического анализа. Сб. статей II Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 2021. С. 131. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45695617&pff=1>
13. *Ланцов В., Владимиров Е.* // Силовая Электроника. 2010. № 5. С.64. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15273991>
14. *Семкин Н.Д., Пияков А.В., Воронов К.Е., Богоявленский Н.Л., Горюнов Д.В.* // ПТЭ. 2007. № 2. С. 140. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9495297>
15. *Семкин Н.Д., Воронов К.Е., Пияков А.В., Пияков И.В.* // ПТЭ. 2009. № 4. С. 159. <https://elibrary.ru/item.asp?id=12601110>
16. *Пияков А.В., Сухачев К.И., Дорофеев А.С., Бандяев В. А.* // Труды МАИ. 2022. № 124. <https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-20>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Фотография высоковольтного умножителя напряжения ускорителя (Самарский университет).
- Рис. 2.** Фото линейного электростатического ускорителя (Самарский университет).
- Рис. 3.** Зависимость Q/m от скорости частицы V на выходе ЛЭСУ: точки – эксперимент, пунктир – аппроксимация выражением вида $Q/m = 3.9 \cdot 10^{-6} V^2$.
- Рис. 4.** Зависимость скорости частицы в ЛЭСУ от ее координаты при разных начальных фазах пульсации источника. Внизу показана система ускоряющих трубок ЛЭСУ.
- Рис. 5.** Зависимость относительного отклонения скорости частицы от скорости на выходе ЛЭСУ при пульсации высоковольтного напряжения с частотой 20 кГц.
- Рис. 6.** Зависимость относительного отклонения скорости частицы от скорости на выходе ЛЭСУ при пульсации высоковольтного напряжения с частотой 50 Гц.
- Рис. 7.** Схема формирования и измерения высоковольтного напряжения ЛЭСУ.
- Рис. 8.** Зависимость амплитуды пульсации от емкости конденсаторов C_m умножителя напряжения.
- Рис. 9.** Зависимость амплитуды пульсации от емкости конденсаторов C_m умножителя напряжения.



Рис. 1.

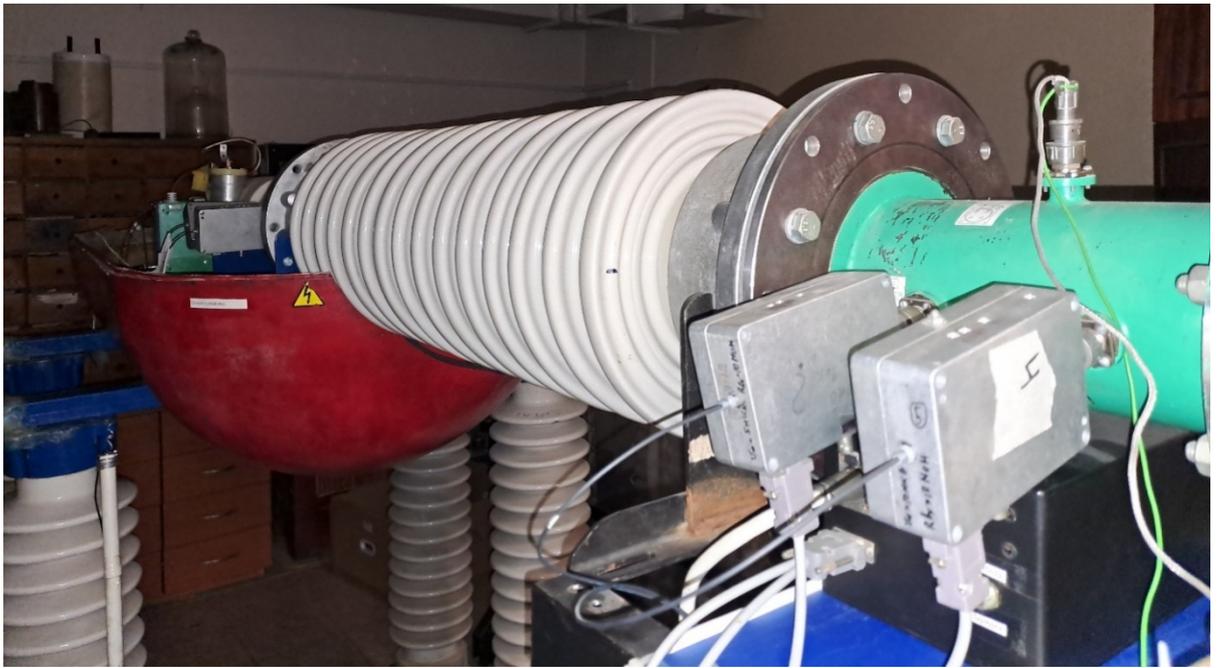
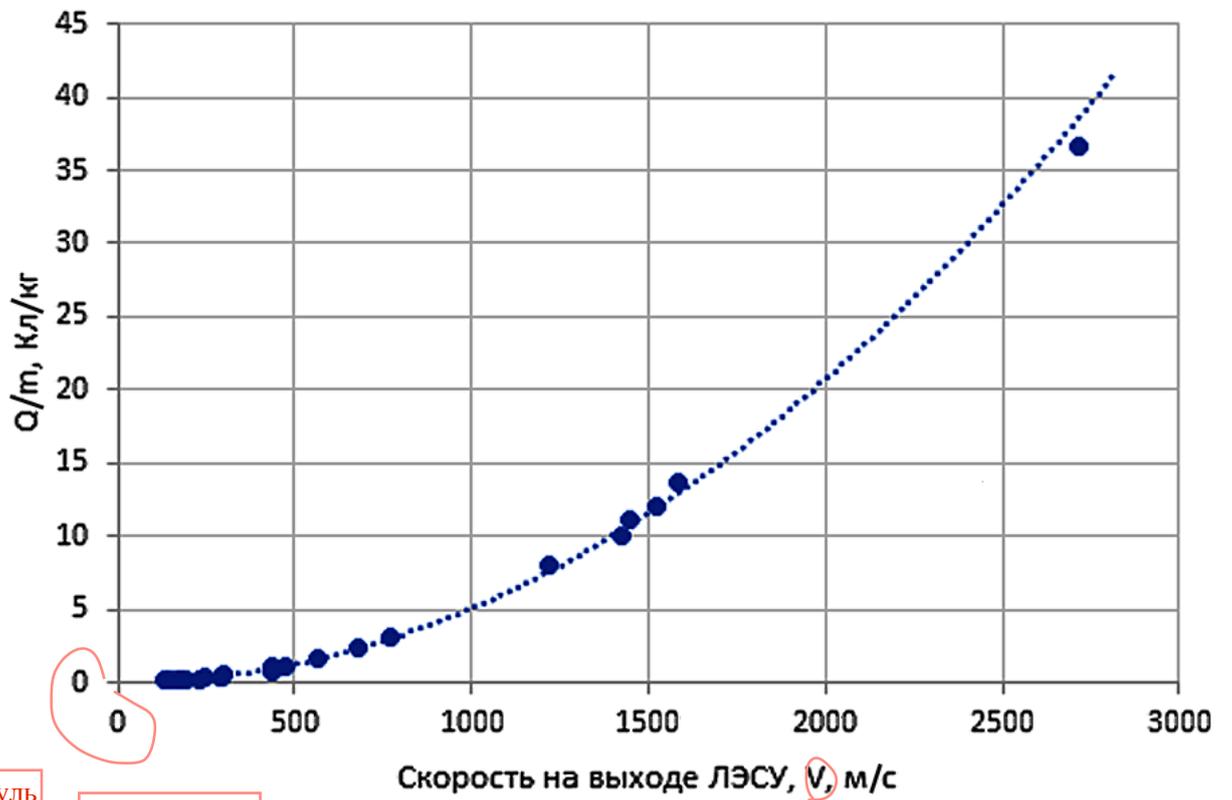


Рис. 2.



единый нуль

удалить сетку

Рис. 3.

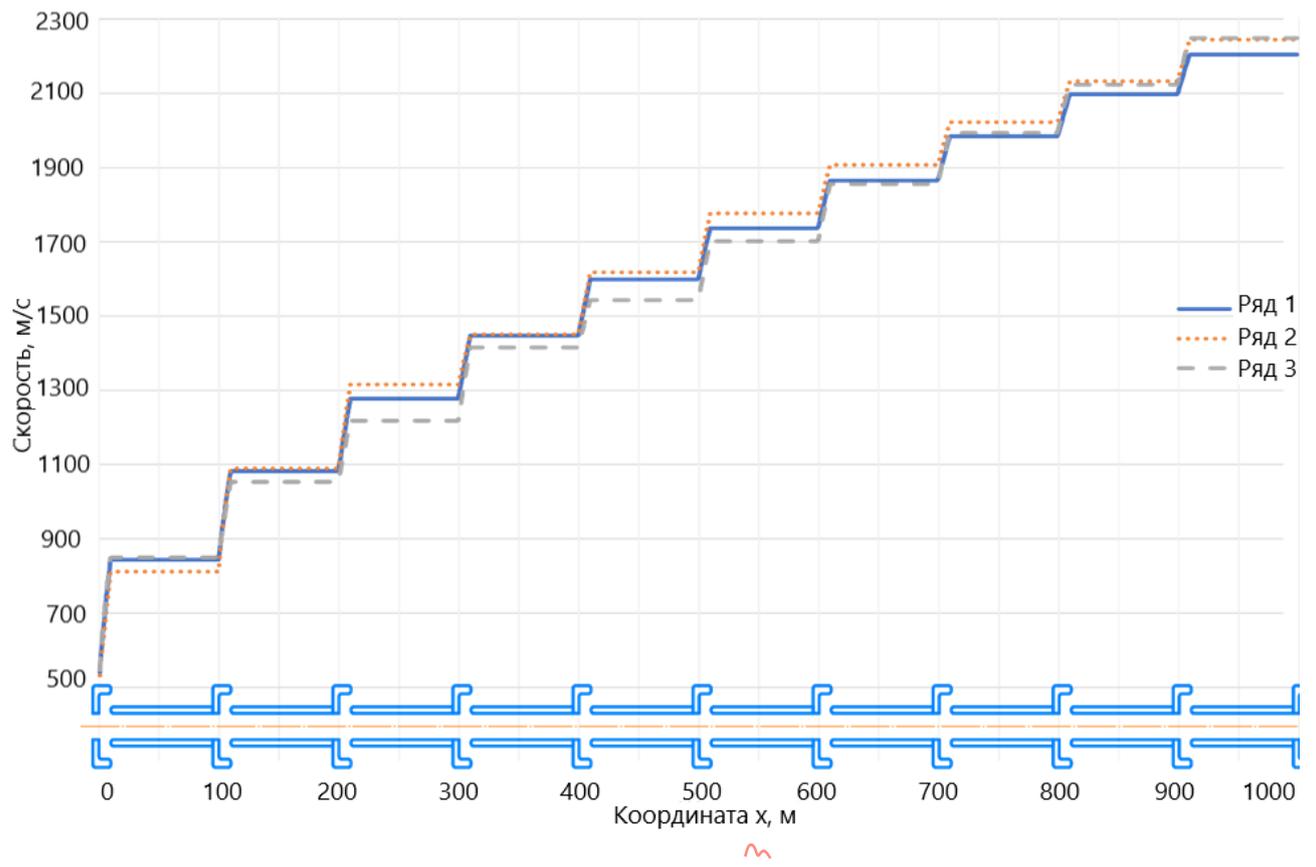


Рис. 4.

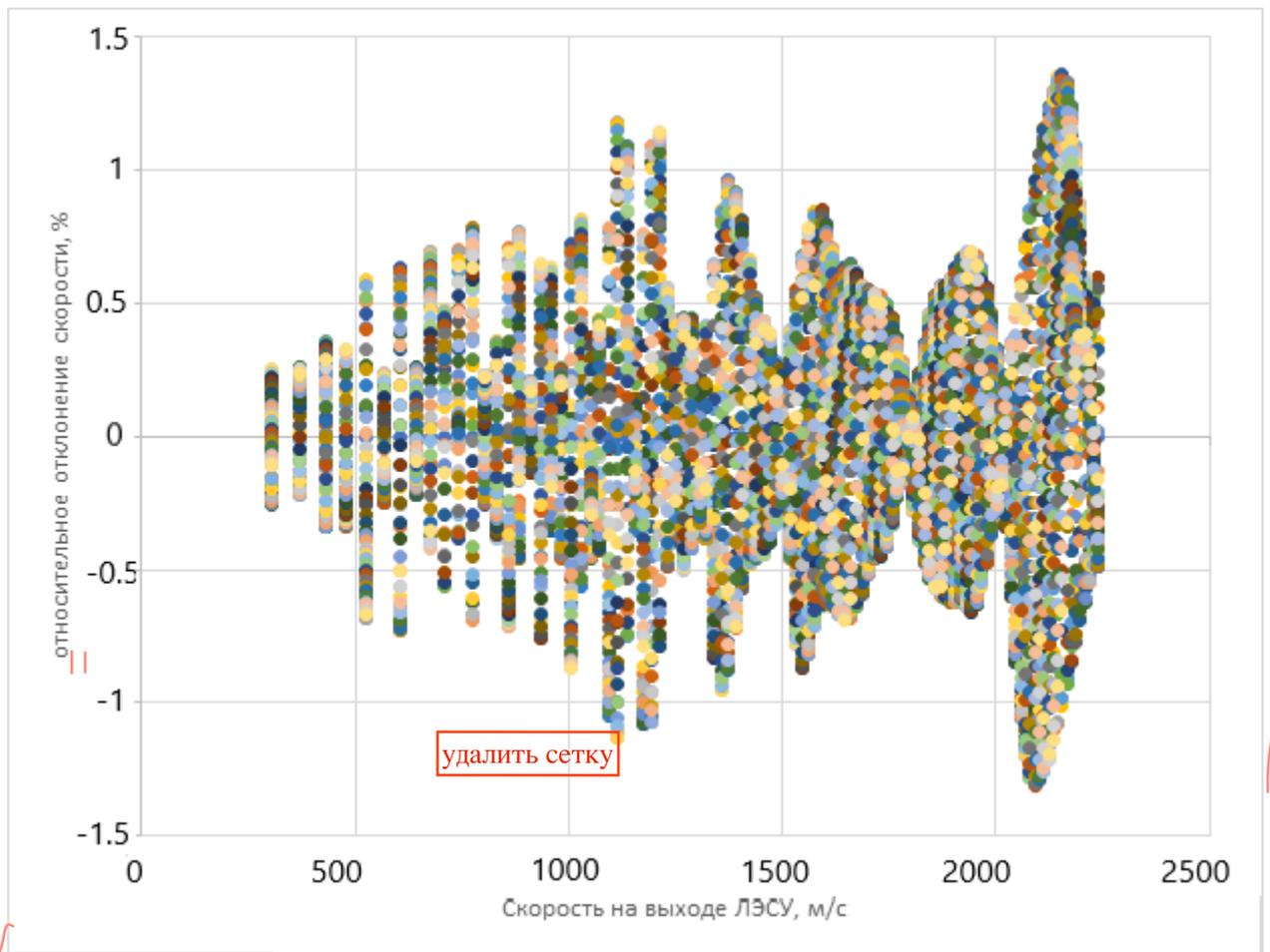


Рис. 5.

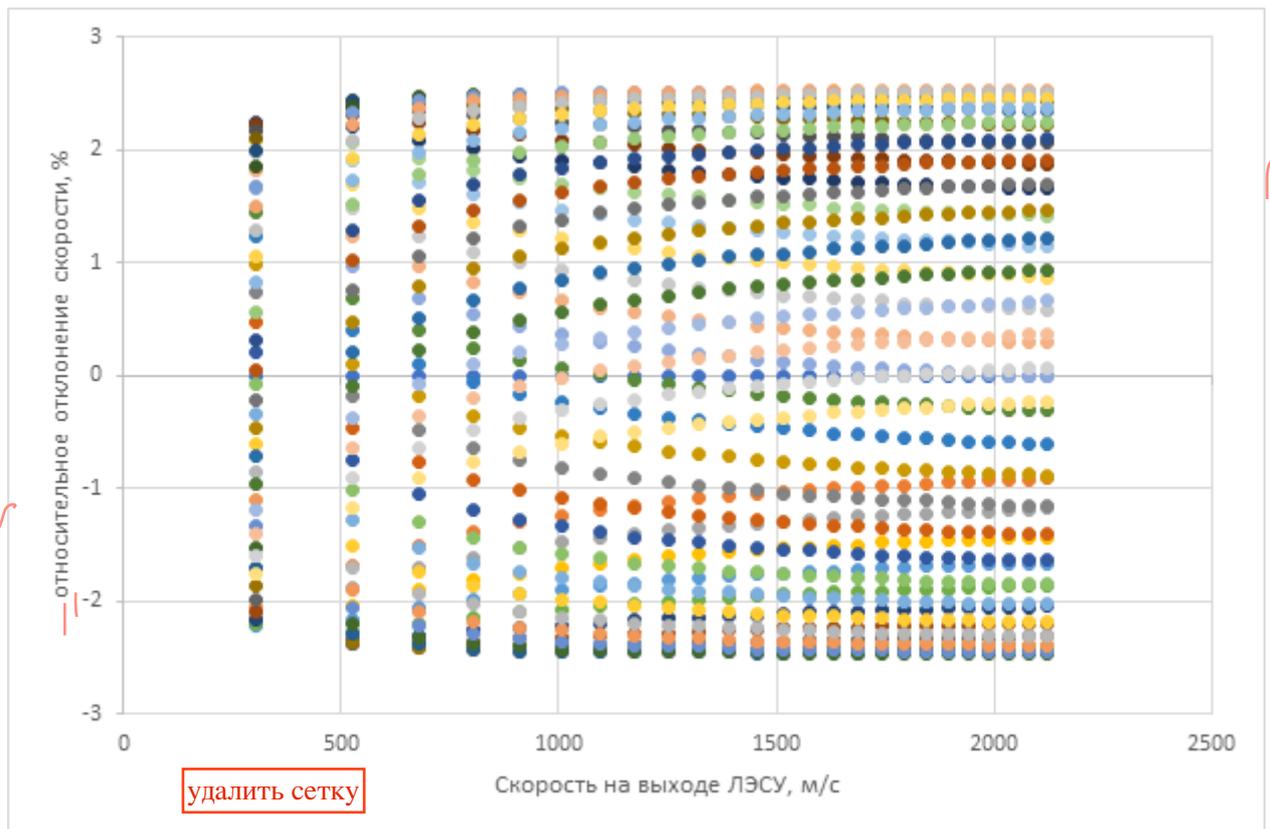


Рис. 6.

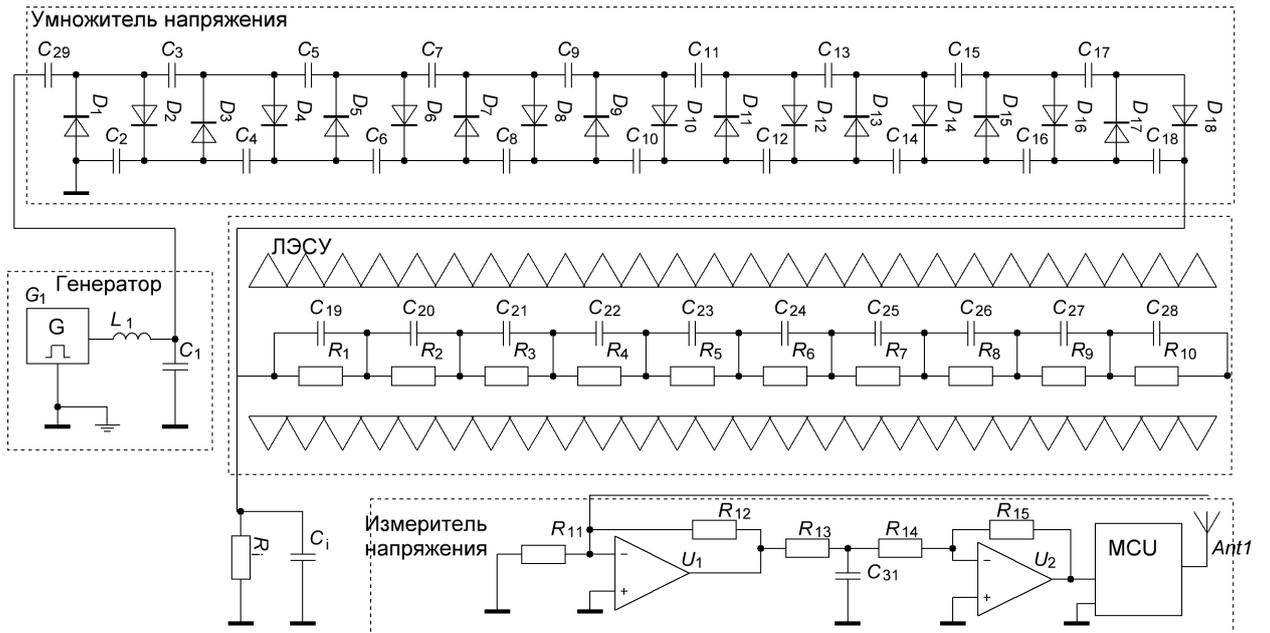
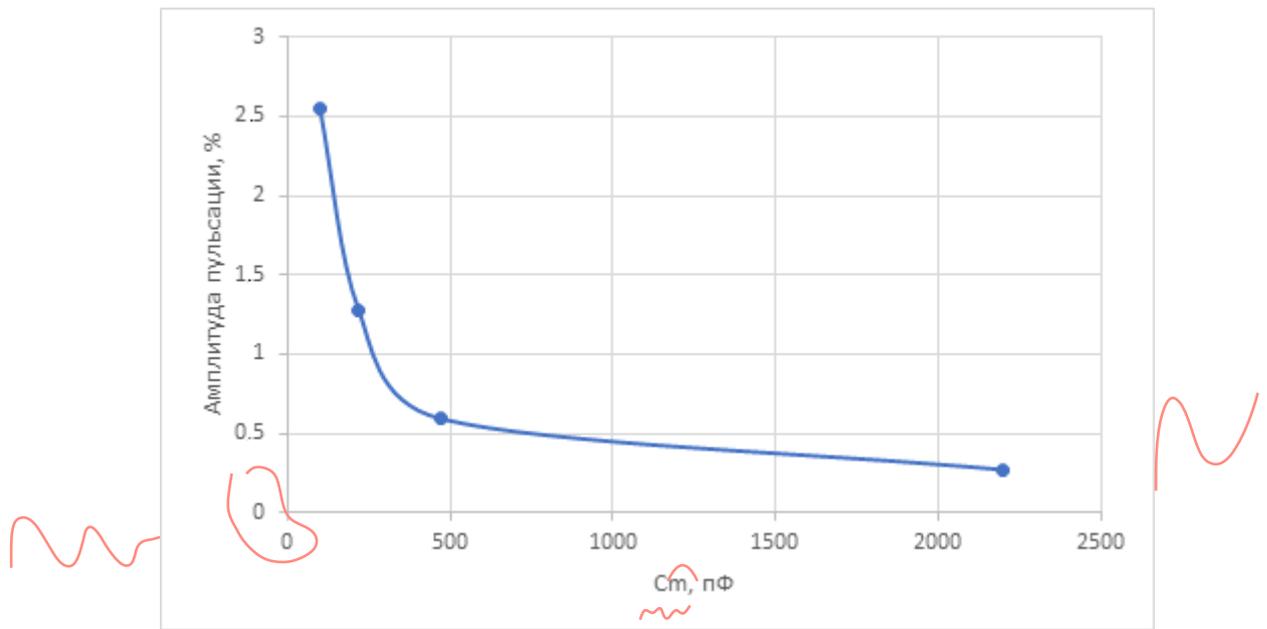


Рис. 7.



один общий ноль

удалить сетку

Рис. 8.

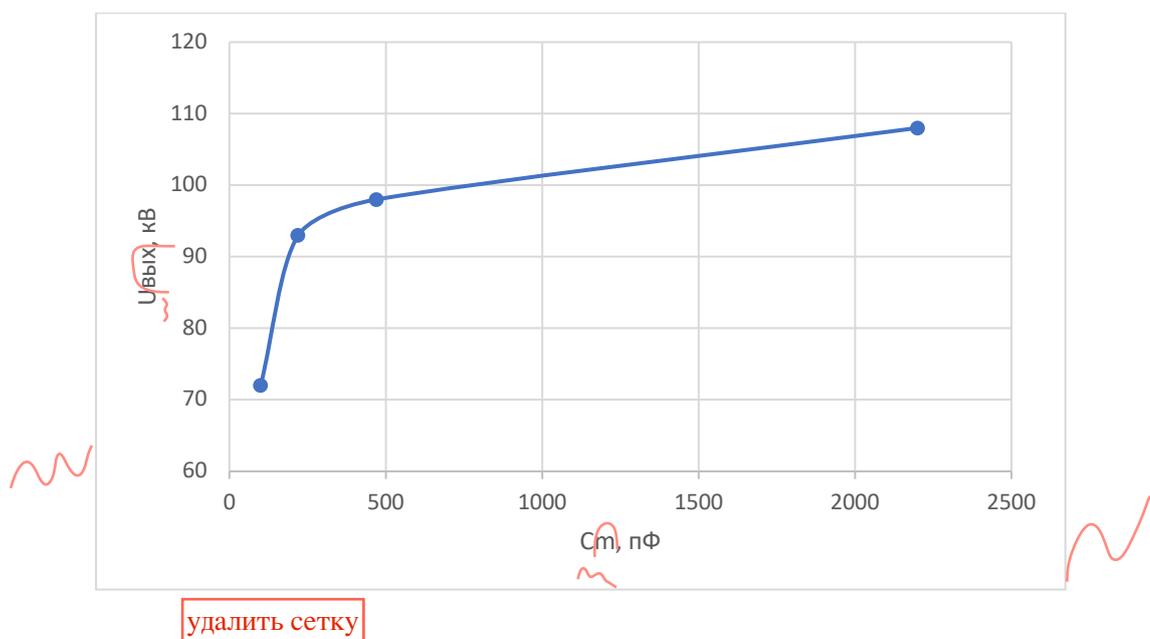


Рис. 9.