

Научная статья  
УДК 62-523.2  
DOI: [10.34759/trd-2022-124-20](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-20)

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМ УСКОРИТЕЛЕМ С ВЫЧИСЛЕНИЕМ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Алексей Владимирович Пияков<sup>1</sup>, Кирилл Игоревич Сухачёв<sup>2</sup>,  
Александр Сергеевич Дорофеев<sup>3</sup>, Вячеслав Александрович Бандяев<sup>4</sup>✉

<sup>1,2,3,4</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королёва,  
Самара, Россия

<sup>1</sup>[piyakov@ssau.ru](mailto:piyakov@ssau.ru)

<sup>2</sup>[kir.sukhachev@gmail.com](mailto:kir.sukhachev@gmail.com)

<sup>3</sup>[alexandrdorofeev.ikp@yandex.ru](mailto:alexandrdorofeev.ikp@yandex.ru)

<sup>4</sup>[bandyaev.va@ssau.ru](mailto:bandyaev.va@ssau.ru)✉

**Аннотация.** В статье описан метод измерения параметров частицы позволявший изменить подход к формированию пачки импульсов на трубках дрейфа, создающих постоянно ускоряющее поле для заряженной частицы. Представлена схема системы управления, и описан её принцип работы. Разработано HDL описание, позволяющее в реальном времени производить необходимые расчеты и реализующее остальную логику управления ускорителем. Проведено временное моделирование разработанных модулей, и оценена погрешность вычисления.

**Ключевые слова:** электродинамический ускоритель частиц, микрочастицы, система управления, ПЛИС, IP-ядро, микроконтроллеры.

**Для цитирования:** Пияков А.В., Сухачев К.И., Дорофеев А.С, Бандяев В.А. Система управления электродинамическим ускорителем с вычислением параметров движения в реальном времени // Труды МАИ. 2022. № 124. DOI: [10.34759/trd-2022-124-20](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-20)

## ELECTRODYNAMIC ACCELERATOR CONTROL SYSTEM WITH CALCULATION OF MOTION PARAMETERS IN REAL TIME

Alexey V. Piyakov<sup>1</sup>, Kirill I. Sukhachev<sup>2</sup>, Alexander S. Dorofeev<sup>3</sup>,  
Vyacheslav A. Bandyayev<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev,  
Samara, Russia

<sup>1</sup>[piyakov@ssau.ru](mailto:piyakov@ssau.ru)

<sup>2</sup>[kir.sukhachev@gmail.com](mailto:kir.sukhachev@gmail.com)

<sup>3</sup>[alexandrdorofeev.ikp@yandex.ru](mailto:alexandrdorofeev.ikp@yandex.ru)

<sup>4</sup>[bandyaev.va@ssau.ru](mailto:bandyaev.va@ssau.ru) ✉

**Abstract.** The work relates to the field of accelerator technology and is devoted to improving the control system of an electrodynamic linear accelerator of dusty charged particles. The existing accelerator is used to simulate the factors of the space environment and makes it possible to study the effect of high-speed micron-sized particles on the elements of the surface of the spacecraft under conditions close to real. However, this accelerator has a complex control system that requires the operator to control a large number of parameters in real time and to constantly adjust during the experiment. The need to measure physical

quantities and calculate particle parameters, as well as manual control, increase the error in the formation of accelerating pulses in the dynamic section, which leads to inefficient particle acceleration or the loss of most of them.

The article proposes a new method for controlling a dynamic accelerator, the basis of which is a method for determining the parameters of a particle, which makes it possible to refuse any measurements other than time-of-flight, made in an improved measuring section. The structure of the measurement section is presented in the article, while it is clear that minor changes are required in the already existing design of the accelerator. A control system has been developed that allows, according to data from time-of-flight sensors, to automatically control the dynamic section of the accelerator with high accuracy. This is achieved, among other things, by refusing to use memory banks with pre-calculated voltage switching times on the drift tubes. In the new control system, the calculation of the particle position and its instantaneous velocity occurs in real time, since the calculation of the particle's specific charge is no longer required. Knowing the position of the particle in the path allows timely switching of the voltage on the drift tubes while the particle is inside them.

The proposed method for determining the particle parameters and the control system have a calculation error associated with the discreteness of the measured time intervals. An analysis of the error and its influence on the acceleration process was carried out, from which it is clear that the system allows particles to be accelerated in a wide range of specific charges, and the maximum deviation of the particle coordinate when switching the voltage on the drift tubes does not cause it to leave the fieldless space of the drift tube. In addition, the system has a margin of accuracy, since the simulation was carried out for the existing

accelerator design and an increase in the frequency of time-of-flight sensors and a computer is not required, although this is possible if necessary.

Thus, the proposed method for controlling a dynamic accelerator makes it possible to automate the process of conducting experiments and increase the efficiency of particle acceleration in an extended range of charges, masses, and initial velocities, and also makes it possible to increase the number of accelerating sections, thereby increasing the equivalent accelerating voltage of the system.

**Keywords:** particle accelerator, electrodynamic accelerator, microparticles, control system, FPGA, IP-core, microcontrollers, real-time computation

**For citation:** Piyakov A.V., Sukhachev K.I., Dorofeev A.S., Bandyayev V.A. Electrodynamic accelerator control system with calculation of motion parameters in real time. *Trudy MAI*, 2022, no. 124. DOI: [10.34759/trd-2022-124-20](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-20)

## Введение

Актуальность разработки, модернизации и повышения эксплуатационных свойств ускорителей, позволяющих моделировать факторы космической среды, многократно показана в работах [1-8]. В данной статье представлена дальнейшая эволюция ускорителя твердых частиц [9-19]. До этого предлагалось использовать заранее рассчитанные временные интервалы переключения электродинамического ускорителя, хранящиеся в памяти системы управления. Интервалы вычислялись для актуального диапазона удельных зарядов частиц и начальной скорости частицы с некоторым шагом, величина которого наряду с точностью измерения скоростей существенным образом влияют на точность переключения. Система управления,

описанная в данной статье, позволяет отказаться от определения физических параметров частицы таких как масса и заряд, и оперировать только с параметрами движения, вычисляемыми в реальном времени. Данный подход позволяет упростить схемотехнику системы управления, увеличить диапазон ускоряемых частиц, увеличить точность переключения, а, следовательно, и эффективность ускорения.

### **Описание конструкции измерительной секции ускорителя**

Для проведения экспериментов по соударению высокоскоростных частиц с материалами конструкций космических аппаратов ранее нами был разработан и построен ускоритель, последняя модернизация которого представлена в работе [19]. Данный ускоритель позволяет моделировать в лабораторных условиях столкновения микрометеоритов размером  $1 \div 10$  мкм и скоростями  $1 \div 15$  км/с с различными материалами. На рисунке 1 представлена структурная схема модернизированного ускорителя частиц, который обладает рядом преимуществ перед прототипом и позволяет добиться большей эффективности ускорения частиц. Под эффективностью понимается более высокая конечная скорость частицы при прочих равных условиях, возникающая из-за большей точности в определении момента переключения напряжения на трубках дрейфа.

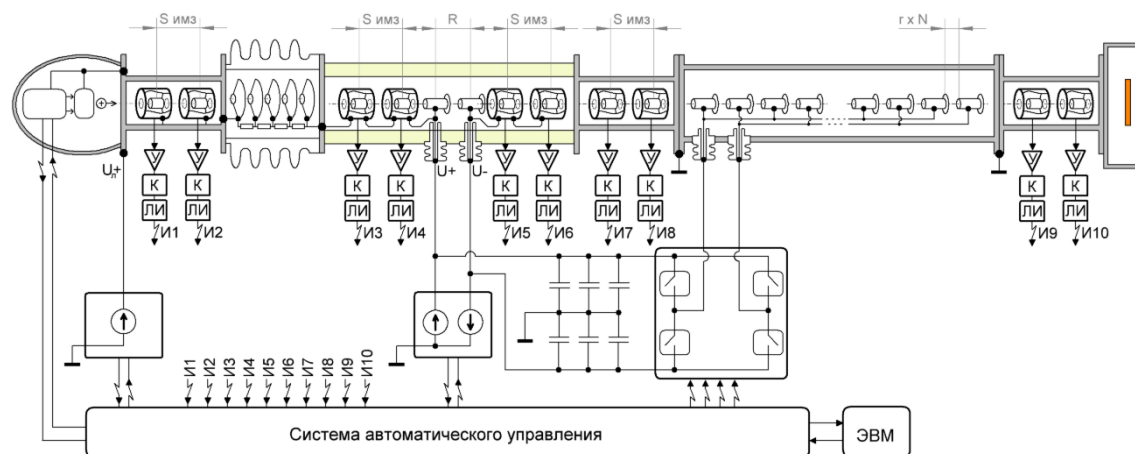


Рис. 1 - Структурная схема ускорителя

Ускоритель состоит из инжектора, линейного электростатического ускорителя (ЛЭСУ), линейного электродинамического ускорителя (ЛЭДУ), трехизмерительных линеек, и одной измерительной секции, позволяющей определить ускорение частицы, необходимое для определения положения частицы при движении в тракте ЛЭДУ. Измерительные линейки служат для увеличения информативности и точности эксперимента, а также для контроля дополнительных параметров. Ускорительный тракт заканчивается камерой для экспериментов.

Измерительная секция состоит из пары трубок дрейфа, полностью идентичных электродам ЛЭДУ, и из двух измерителей скорости, каждый из которых находится под потенциалом соседней трубки дрейфа. Трубки дрейфа измерительной секции соединены с блоком питания ЛЭДУ, который формирует двухполярное напряжение на высоковольтном усилителе пачки (ВУП), обеспечивающем поочередную коммутацию трубок дрейфа к полюсам блока питания ЛЭДУ. Таким образом, измеряя временные интервалы прохождения частицей базы измерителя скорости установленного до трубок дрейфа измерительной секции и после, можно вычислить усредненное ускорение, которое будет получать данная частица, при прохождении

каждого интервала между трубками дрейфа в ЛЭДУ. При таком подходе нет необходимости отдельно вычислять удельный заряд частицы и измерять напряжения как на трубках дрейфа, так и на ЛЭСУ. Следовательно, определение координат частицы сводится к вычислению следующих уравнений:

$$\begin{cases} v(t) = v(t - \Delta t) + a(t)\Delta t \\ x(t) = x(t - \Delta t) + v(t)\Delta t \end{cases}; \quad (1)$$

Измерения скоростей частицы, в том числе до и после трубок дрейфа измерительной секции происходит путем подсчета тактовых импульсов генератора между импульсом с первого и второго пролетных датчиков измерителя. Таким образом скорость частицы, измеренная  $i$ -м датчиком будет равна:

$$V_i = \frac{S_{изм}}{N_i T}, \quad (2)$$

где  $S_{изм}$  – базовое расстояние между пролетными датчиками,  $N_i$  – количество тактов за время пролета базового расстояния-го датчика,  $T$  – период тактового сигнала. Принцип работы измерительной секции показан на рисунке 2.

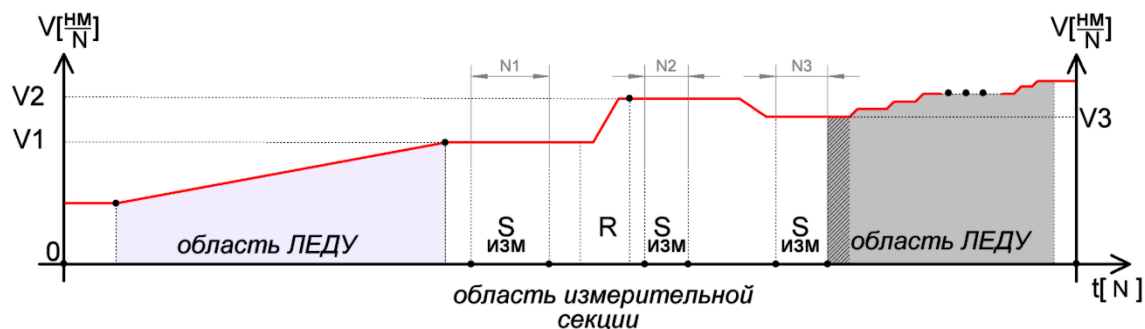


Рис. 2 - Принцип работы измерительной секции

Если во всех уравнениях  $\Delta t$  взять равным одному периоду  $T$  тактового сигнала, то все временные интервалы можно заменить количеством тактов, а ускорение

частицы, полученное при прохождении трубок дрейфа в измерительной секции, можно будет найти по формуле:

$$a = \frac{(N_1 + N_2)(N_1 - N_2)}{N_1^2 N_2^2} \times k_i, \quad (3)$$

где  $k_i$  – поправочный коэффициент, учитывающий геометрию измерительной секции и дрейфовых трубок, а также позволяющий учитывать падение напряжения на конденсаторах БП ЛЭДУ. Коэффициент  $k_i$  ищется по формуле:

$$k_i = Z \frac{S_{изм}^2}{2R} 10^6, \quad (4)$$

где  $S_{изм}$  – расстояние между пролетными датчиками в миллиметрах,  $R$  – расстояние между центрами трубок дрейфа, также в миллиметрах,  $Z$  – нормировочный коэффициент, позволяющий уменьшить погрешность, вызванную целочисленными операциями.

Таким образом, по результатам измерения времени пролета между датчиками, для каждой частицы вычисляется ускорение по формулам (3) и (4), потом скорость (2), с которой частица попадает в область динамического ускорителя. Данные вычисления необходимо сделать за время меньшее, чем время, затраченное частицей на вхождение в первую трубку дрейфа ЛЭДУ. Далее за время  $T$ , равное периоду тактового сигнала, вычислять текущую координату по оси  $X$  и мгновенную скорость частицы по системе уравнений (1), которая примет вид:

$$\begin{cases} v(t) = v(t - T) + a P_{UEi} G(x) \\ x(t) = x(t - T) + v(t) \end{cases}, \quad (5)$$



где  $P_{UE_i}$  – коэффициент падения напряжения на конденсаторах для  $i$ -ой секции, находящийся в диапазоне от 0 до 100, так для первой ускорительной пары трубок дрейфа  $P_{UE_1} = 100$ , а далее снижается, по заранее рассчитанному закону.

### Описание системы автоматического управления ускорителем

Для автоматического управления всем ускорителем была разработана система управления структурная схема, которой представлена на рисунке 3.

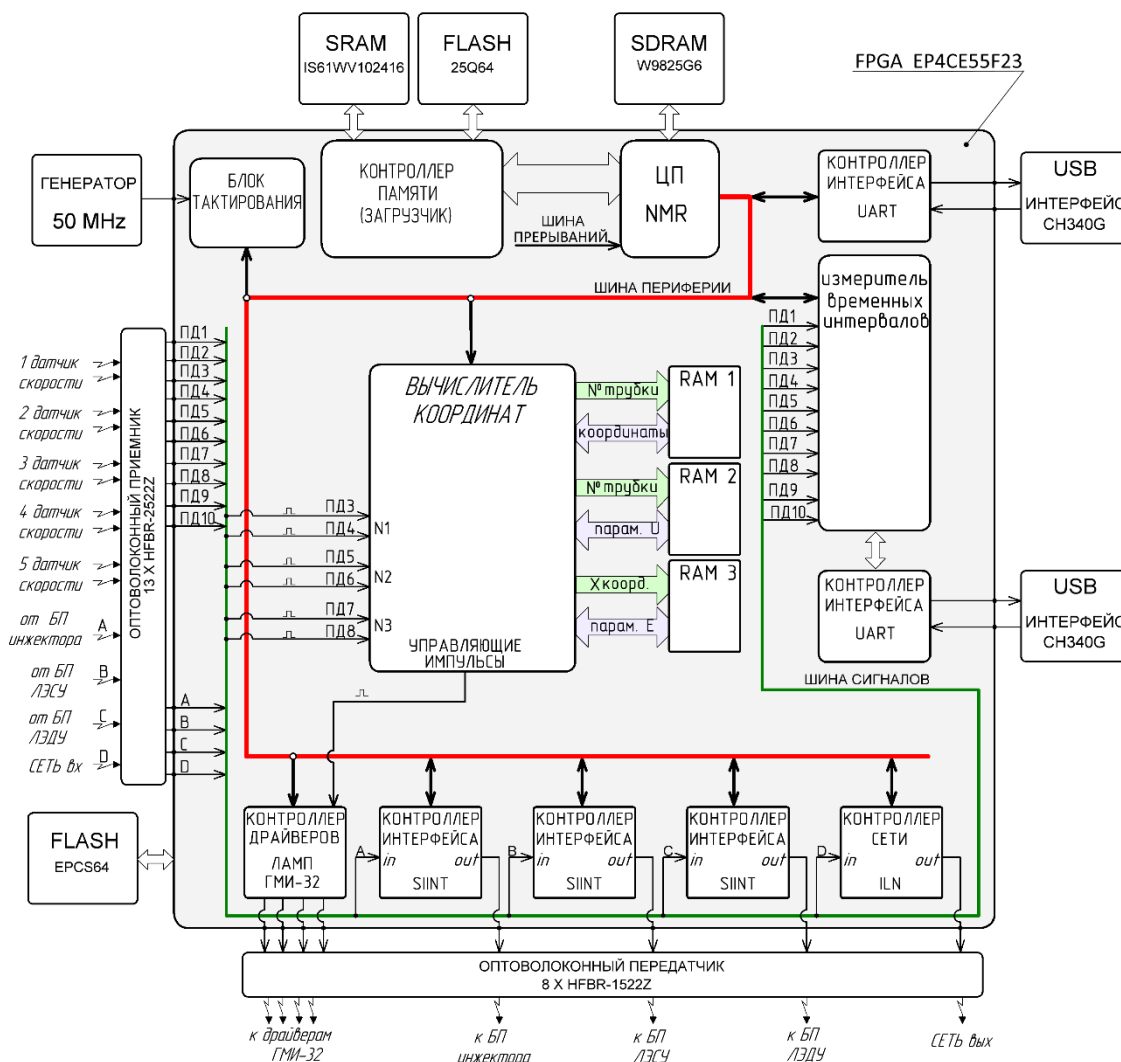


Рис. 3 – Структурная схема системы автоматического управления

Система управления соединена с блоками питания и пролётными датчиками ускорителя посредством оптоволоконных приемников и передатчиков. Внешние

микросхемы памяти нужны для взаимодействия с софт процессором и реализации дополнительных алгоритмов управления. Два USB интерфейса служат для передачи отдельного потока данных с временными интервалами и для реализации взаимодействия с процессором. Основным элементом системы управления является микросхема FPGA Cyclone4 EP4CE55F23 внутри которой реализованы все управляющие и вспомогательные модули. Пример реализации вычислителей на базе ПЛИС представлен в [20-22]. Реализация софт процессора подробно представлена в [23]. Наиболее важным в работе ускорителя является модуль, вычисляющий координаты и формирующий управляющие импульсы для драйверов ламп ГМИ-32 высоковольтного усилителя пачки. Данный модуль соединен с процессором по шине периферии для первоначальной прошивки и корректировки таблицы координат и поправочных коэффициентов в блоках оперативной памяти RAM1-3. Модуль работает следующим образом: одновременно с подсчетом тактовых импульсов  $N_1$  и  $N_2$  вычисляются их квадраты  $N_1^2$ ,  $N_2^2$  и отдельно суммы и разности  $(N_1 + N_2)$  и  $(N_1 - N_2)$  соответственно, что позволяет сразу после детектирования частицы в последнем пролетном датчике измерительной секции приступить к вычислениям. При принятых размерностях величин расчеты проводятся с 67 битными числами. Для универсальности полученного описания для выполнения умножения и деления с остатком использованы алгоритмы машинной арифметики, что позволило существенно сэкономить логическую емкость ПЛИС и при этом не сильно увеличить время вычисления, так все операции, описанные выше, выполняются менее чем за 8 мкс. После того как будет измерен параметр  $N_3$ , вычисляется скорость частицы, являющаяся начальной для динамического тракта. Важным условием является точная

установка датчика скорости относительно первой трубки дрейфа, так как в этот момент координата частицы еще не вычисляется, а попадание частицы в экранирующую область первой трубки дрейфа определяется обнулением декрементирующего счетчика с началом отсчета  $aN_3$ , где коэффициент  $a$  – это отношение расстояния от пролетного датчика до первой трубки дрейфа к базовому расстоянию  $S_{изм}$ . Данная область с равномерным движением частицы показана на рисунке 2 заштрихованным сектором. Как только счетчик обнулится, считается, что частица находится в центре первой трубки дрейфа, на трубку подается положительный потенциал, а на следующую за ней отрицательный. Данное положение является точкой отсчета по оси  $X$  тракта ЛЭДУ. Величина ускорения, вызванного полем трубок дрейфа и начальная скорость к этому моменту являются известными величинами. Пока частицы не прошла центр второй трубки дрейфа на шинах адреса RAM1 и RAM2 установлен ноль и от них возвращаются координата центра второй трубки дрейфа и поправочный коэффициент напряжения соответственно. Полный цикл формирования управляющих импульсов модулем вычислителя координат представлены на рисунке 4.

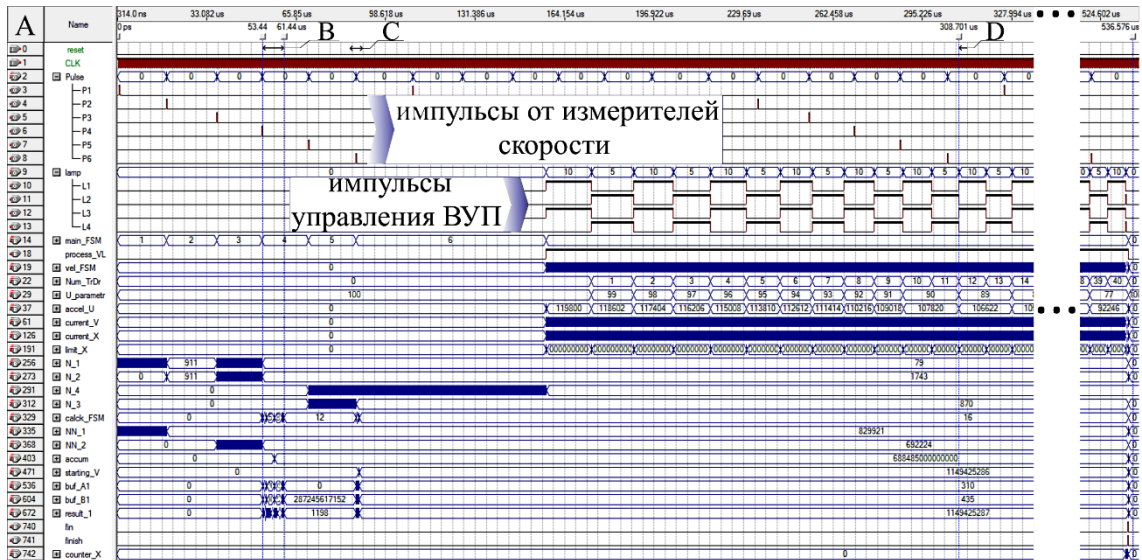


Рис. 4 – Диаграммы работы модуля вычислителя координат

На рисунках 5 и 6 укрупненно представлены интервалы вычисления начальных для данной частицы параметров движения и непосредственно процесс вычисления уравнения движения в тракте ЛЭДУ соответственно.



Рис. 5 – Процесс вычисления начальных параметров



Рис. 6 – Процесс вычисления параметров движения частицы

Модуль вычислителя на каждом такте рассчитывает параметры движения частицы с учетом поправочных коэффициентов из RAM2 и RAM3 и сравнивает текущую координату с координатой из RAM1. При их совпадении, генерируются управляющие импульсы, поступающие на высоковольтный усилитель пачки (ВУП) через соответствующие блоки драйверов, формируя тем самым постоянно ускоряющее поле идентичное полю в измерительной секции. Одновременно происходит увеличение адреса на шинах RAM1 и RAM2 на единицу (Num\_TrDr на рисунке 4). С блока RAM1 возвращается новое значение координаты X, соответствующего центру следующей трубки дрейфа, а с блока и RAM2 возвращается поправочный коэффициент, позволяющий учитывать постепенную просадку напряжения на конденсаторах БП ЛЭДУ по мере формирования пачки. В RAM3

могут быть размещены поправочные коэффициенты, отражающие неоднородность поля между трубками дрейфа, адресом для RAM3 служит локальное положение частицы по оси  $X$ – положение в области между актуальными трубками дрейфа. Коэффициенты, хранящиеся в блоках RAM2-3, рассчитываются заранее с необходимой точностью, так как геометрия поля и падение напряжения на конденсаторах не зависят от параметров частицы, однако они могут быть модифицированы в процессе работы при соответствующем алгоритме управляющей программы. Умножение ранее посчитанного ускорения на поправочные коэффициенты из памяти происходит на субтактовой частоте по отношению к остальным процессам. В RAM1 хранятся координаты центров трубок дрейфа, которые необходимо перевести в формат, позволяющий добиться необходимой точности при целочисленных вычислениях, перевод происходит по следующей формуле:

$$X_{\mu i} = ZL_i 10^8, \quad (6)$$

где  $X_{\mu i}$  – координата центра  $i$ -ой трубки дрейфа, в формате пригодном для записи в RAM1,  $L_i$  – расстояние до центра  $i$ -ой трубки дрейфа в миллиметрах,  $Z$  – нормировочный коэффициент.

Модуль вычислителя обеспечивает первоначальную селекцию частиц, так частицы с малым удельным зарядом, а, следовательно, и низким ускорением, не будут ускоряться в тракте ЛЭДУ. После формирования пачки при ускорении частицы, прошедшей первоначальную селекцию, вычислитель блокируется на время необходимое для подзарядки конденсаторов БП ЛЭДУ.

Условием высокой эффективности ЛЭДУ является точность определения положения частицы, если погрешность будет высокой, то переключения будут происходить несинхронно с движением частицы и её конечная скорость будет ниже потенциально возможной. Основными параметрами, влияющими на точность определения координаты по оси  $X$ , являются величина базового расстояния измерителей скорости  $S_{изм}$  и нормировочный коэффициент  $Z$ . На рисунке 7 представлена зависимость абсолютной погрешности в определении координаты от параметров  $S_{изм}$  и  $Z$ .

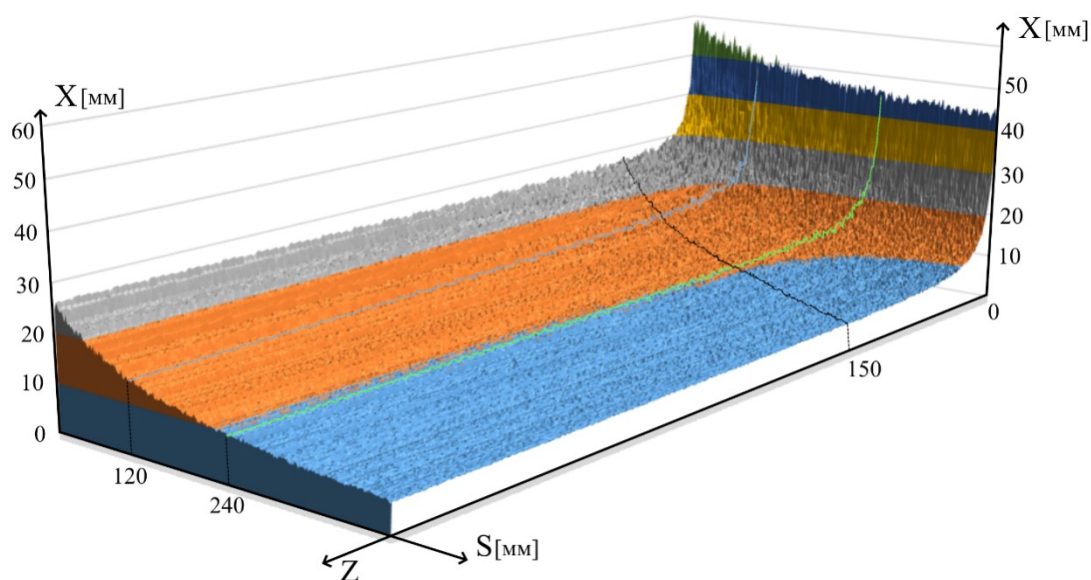


Рис. 7 – Погрешность определения координаты

Из рисунка 7 видно, что нормировочный коэффициент  $Z$  следует выбирать большим 100, далее он слабо влияет на погрешность, а базовое расстояние  $S_{изм}$ , выбирается исходя из конструктивных соображений. Моделирование проводилось для частиц с удельным зарядом от 0 до 100, на типовом интервале времени 400 мкс.

Разработанный ранее ускоритель имеет измерительную базу  $S_{изм}$  равную 120мм, но при увеличении частоты тактирования измерителей скорости в 2 раза,

эквивалентная база также увеличится в 2 раза и составит 240мм. На рисунке 8 представлен возможный разброс абсолютной погрешности определения координаты для этих двух случаев от удельного заряда частиц.

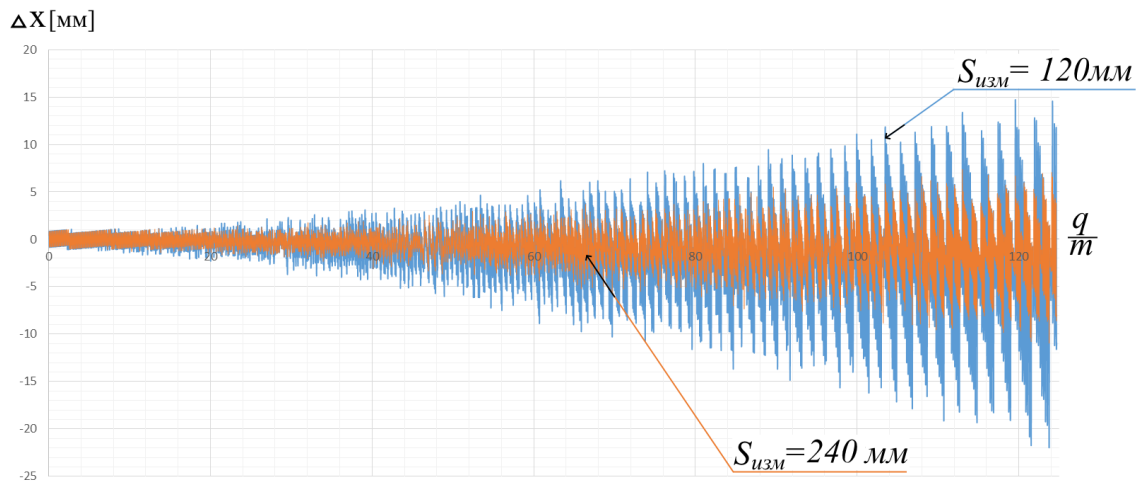


Рис. 8 – Погрешность определения координаты

Из графиков на рисунках 7 и 8 видно, что предложенная система управления позволяет производить ускорение частиц в широком диапазоне удельных зарядов, и для наиболее быстрых частиц с удельным зарядом более 120 погрешность вычисления координаты не вызывает, при переключении, выход частицы из экранированного участка трубок дрейфа, составляющего 40 мм в текущем варианте конструкции ЛЭДУ.

## Выводы

Предложена система управления ускорителем заряженных частиц микронного диапазона, позволяющая увеличить динамический диапазон ускорителя и его



эффективность в следствии повышении точности переключения напряжения на трубках дрейфа при движении частицы. Схема управления при этом упрощается, так как нет необходимости в большом объеме памяти, хранящем массив с временами переключения для каждого варианта удельного заряда и начальной скорости. Применение измерительной секции позволяет упростить расчеты, проводимые в реальном времени для каждой частицы, а также отказаться от измерения напряжений как на статическом, так и динамическом ускорителях. Система имеет большой запас по точности, так как удовлетворяет требованиям актуальной конструкции ЛЭДУ работая на 40% от максимальной частоты измерителей. Кроме того, вычислительная мощность СУ позволяет производить централизованное управление всеми системами, производить сбор, обработку данных и передачу их на ПК, позволяет вводить и реализовывать алгоритмы более тонкого автоматического управления и настройки параметров и коэффициентов.

### **Список источников**

1. Novikov L.S., Voronov K.E., Semkin N.D. et al. Measurement of solid microparticle flux in geosynchronous orbit // In: ESA Symp. Proc. on Environment Modelling for Space-based Applications, ESTEC, Noordwijk, 18-20 September, 1996, pp. 343-348.
2. Semkin N.D., Kalaev M.P., Telegin A.M. et al. Multilayer film structures under the influence of micrometeoroids and space debris // Applied Physics, 2012, vol. 2, pp. 104-115.
3. Назаренко А.И. Моделирование космического мусора: монография. - М.: ИКИ РАН, 2013. – 216 с.

4. Telegin A.M., Piyakov A.V. A study of the performance of an induction sensor for an accelerator of charged microparticles // Instruments and Experimental Techniques, 2017, vol. 60 (6), pp. 875-879. DOI: [10.1134/s0020441217060100](https://doi.org/10.1134/s0020441217060100)
5. Ковалев Р.В., Лунев В.В., Минюшкин Д.Н. Взаимодействие высокоскоростных частиц с тонкостенной металлической оболочкой // Космонавтика и ракетостроение. 2000. № 18. С. 119-126.
6. Новиков Л.С. Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты. - М.: Университетская книга, 2009. - 104 с.
7. Воробьев А.А., Зыкова Т.С., Спицын Д.Д. и др. Моделирование воздействия микрометеоритов и фрагментов космического мусора на космические аппараты // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2011. Т. 120. № 1. С. 27-30.
8. Thomas E., Simolka J., DeLuca M. et al. Experimental setup for the laboratory investigation of micrometeoroid ablation using a dust accelerator // Review of Scientific Instruments, 2017, pp. 1-12. DOI: [10.1063/1.4977832](https://doi.org/10.1063/1.4977832)
9. Slattery J.C., Becker D.G., Hamermesh B., Roy N.L. A Linear Accelerator for Simulated Micrometeors // Review of Scientific Instruments, 1973, vol. 44, pp. 755-762.
10. Семкин Н.Д., Пияков А.В., Воронов К.Е., Помельников Р.А. Ускоритель высокоскоростных твердых частиц. Патент RU 2205525 С2. Бюл. № 15, 27.05.2003.
11. Wang Z., Wurden G.A. Hypervelocity dust beam injection for national spherical torus experiment // Review of Scientific Instruments, 2004, vol. 75, pp. 3436–3438.
12. Semkin N.D., Piyakov A.V., Voronov K.E. et al. A linear accelerator for simulating micrometeorites // Instruments and Experimental Techniques, 2007, vol. 50 (2), pp. 275-281.

13. Semkin N.D., Voronov K.E., Piyakov A.V. et al. Simulation of micrometeorites using an electrodynamical accelerator // Instruments and Experimental Techniques, 2009, vol. 52 (4), pp. 595-601. DOI: [10.1134/S0020441207020194](https://doi.org/10.1134/S0020441207020194)
14. Tomas E., Simolka J., DeLuca M. et al. Experimental setup for the laboratory investigation of micrometeoroid ablation using a dust accelerator // Review of Scientific Instruments, 2017, DOI: [10.1063/1.4977832](https://doi.org/10.1063/1.4977832)
15. Pozwolski A. A compact laser-driven accelerator of macroparticles // Laser and Particle Beams, 2000, vol. 19, pp. 249-252.
16. A. Shu, Collette A. et al. 3 MV hypervelocity dust accelerator at the Colorado Center for Lunar Dust and Atmospheric Studies // Review of Scientific Instruments, 2012. DOI: [10.1063/1.4732820](https://doi.org/10.1063/1.4732820)
17. Piyakov A.V., Rodin D.V. et al. Numerical simulation of motion of dust particles in an accelerator path // CEUR Workshop Proceedings, 2017, vol. 1902, pp. 55-61. DOI: [10.18287/1613-0073-2017-1902-55-61](https://doi.org/10.18287/1613-0073-2017-1902-55-61)
18. Slattery J.C., Becker D.G. et al. A linear accelerator for simulated micrometeors // Review of Scientific Instruments, 1973, vol. 44, pp. 755-762. DOI: [10.1063/1.1686238](https://doi.org/10.1063/1.1686238)
19. Пияков А.В., Родин Д.В. и др. Моделирование системы управления электродинамического ускорителя пылевых частиц // IV международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2018): сборник трудов. - Самара: Новая техника, 2018. - С. 1987-1995.

20. Романов А.М. Оценка точности и синтез нелинейных импульсных математических операций // Труды МАИ. 2020. № 112. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=116374>. DOI: [10.34759/trd-2020-112-14](https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-14).
21. Матафонов Д.Е. Создание и обработка маршрутизатора в стандарте SpaceWire на отечественной программируемой логической интегральной схеме // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=100780>
22. Константинов А.А. Методика реализации уравнений имитатора аэродинамических воздействий на программируемой логической интегральной схеме // Труды МАИ. 2014. № 77. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=53190>
23. Воронов К.Е. Сухачев К.И., Воробьев Д.С. Разработка бортового модуля управления на базе вычислительного IP-ядра // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2021. Т. 8. № 1. С. 24–38.

## References

1. Novikov L.S., Voronov K.E., Semkin N.D. et al. Measurement of solid microparticle flux in geosynchronous orbit, *In: ESA Symp. Proc. on Environment Modelling for Space-based Applications*, ESTEC, Noordwijk, 18-20 September, 1996, pp. 343-348.
2. Semkin N.D., Kalaev M.P., Telegin A.M. et al. Multilayer film structures under the influence of micrometeoroids and space debris, *Applied Physics*, 2012, vol. 2, pp. 104-115.
3. Nazarenko A.I. *Modelirovanie kosmicheskogo musora* (Modeling of space debris), Moscow, IKI RAN, 2013, 216 p.

4. Telegin A.M., Piyakov A.V. A study of the performance of an induction sensor for an accelerator of charged microparticles, *Instruments and Experimental Techniques*, 2017, vol. 60 (6), pp. 875-879. DOI: [10.1134/s0020441217060100](https://doi.org/10.1134/s0020441217060100)
5. Kovalev R.V., Lunev V.V., Minyushkin D.N. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2000, no. 18, pp. 119-126.
6. Novikov L.S. *Vozdeistvie tverdykh chastits estestvennogo i iskusstvennogo proiskhozhdeniya na kosmicheskie apparaty* (The impact of solid particles of natural and artificial origin on spacecraft), Moscow, Universitetskaya kniga, 2009, 104 p.
7. Vorob'ev A.A., Zykova T.S., Spitsyn D.D. et al. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIEM*, 2011, vol. 120, no. 1, pp. 27-30.
8. Thomas E., Simolka J., DeLuca M. et al. Experimental setup for the laboratory investigation of micrometeoroid ablation using a dust accelerator, *Review of Scientific Instruments*, 2017, pp. 1-12. DOI: [10.1063/1.4977832](https://doi.org/10.1063/1.4977832)
9. Slattery J.C., Becker D.G., Hamermesh B., Roy N.L. A Linear Accelerator for Simulated Micrometeors, *Review of Scientific Instruments*, 1973, vol. 44, pp. 755-762.
10. Semkin N.D., Piyakov A.V., Voronov K.E., Pomel'nikov R.A. *Patent RU 2205525 S2*. Byul. no. 15, 27.05.2003.
11. Wang Z., Wurden G.A. Hypervelocity dust beam injection for national spherical torus experiment, *Review of Scientific Instruments*, 2004, vol. 75, pp. 3436–3438.
12. Semkin N.D., Piyakov A.V., Voronov K.E. et al. A linear accelerator for simulating micrometeorites, *Instruments and Experimental Techniques*, 2007, vol. 50 (2), pp. 275-281.

13. Semkin N.D., Voronov K.E., Piyakov A.V. et al. Simulation of micrometeorites using an electrodynamical accelerator, *Instruments and Experimental Techniques*, 2009, vol. 52 (4), pp. 595-601. DOI: [10.1134/S0020441207020194](https://doi.org/10.1134/S0020441207020194)
14. Tomas E., Simolka J., DeLuca M. et al. Experimental setup for the laboratory investigation of micrometeoroid ablation using a dust accelerator, *Review of Scientific Instruments*, 2017, DOI: [10.1063/1.4977832](https://doi.org/10.1063/1.4977832)
15. Pozwolski A. A compact laser-driven accelerator of macroparticles, *Laser and Particle Beams*, 2000, vol. 19, pp. 249-252.
16. A. Shu, Collette A. et al. 3 MV hypervelocity dust accelerator at the Colorado Center for Lunar Dust and Atmospheric Studies, *Review of Scientific Instruments*, 2012. DOI: [10.1063/1.4732820](https://doi.org/10.1063/1.4732820)
17. Piyakov A.V., Rodin D.V. et al. Numerical simulation of motion of dust particles in an accelerator path, *CEUR Workshop Proceedings*, 2017, vol. 1902, pp. 55-61. DOI: [10.18287/1613-0073-2017-1902-55-61](https://doi.org/10.18287/1613-0073-2017-1902-55-61)
18. Slattery J.C., Becker D.G. et al. A linear accelerator for simulated micrometeors, *Review of Scientific Instruments*, 1973, vol. 44, pp. 755-762. DOI: [10.1063/1.1686238](https://doi.org/10.1063/1.1686238)
19. Piyakov A.V., Rodin D.V. et al. *IV mezhdunarodnaya konferentsiya i molodezhnaya shkola «Informatsionnye tekhnologii i nanotekhnologii» (ITNT-2018)*, sbornik trudov. Samara, Novaya tekhnika, 2018, pp. 1987-1995.
20. Romanov A.M. *Trudy MAI*, 2020, no. 112. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=116374>. DOI: [10.34759/trd-2020-112-14](https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-14).
21. Matafonov D.E. *Trudy MAI*, 2018, no. 103. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=100780>

22. Konstantinov A.A. *Trudy MAI*, 2014, no. 77. URL:  
<https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=53190>

23. Voronov K.E. Sukhachev K.I., Vorob'ev D.S. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, 2021, vol. 8, no. 1, pp. 24–38.

Статья поступила в редакцию 05.04.2022

Статья после доработки 06.04.2022

Одобрена после рецензирования 28.04.2022

Принята к публикации 21.06.2022

The article was submitted on 05.04.2022; approved after reviewing on 28.04.2022; accepted for publication on 21.06.2022