

Разработка устройства для измерения мгновенной скорости движения плазмы в электродинамическом ускорителе

А.Д. Соловьев

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
им. М. И. Платова, Новочеркасск*

Аннотация: В ходе проектирования устройства для измерения мгновенной скорости движения плазмы в электродинамическом ускорителе разработана структурная схема реализации разработанного метода. Представлено математическое описание вычисления мгновенной скорости движения плазмы в электродинамическом ускорителе. Обоснован выбор реализуемого метода измерения мгновенной скорости движения плазмы в электродинамическом ускорителе с использованием дифференциально-суммарно-логометрической координатной функции и аппроксимацией сигнала датчиков положения обратно-экспоненциальной функцией. Выполнено моделирование вычислительного блока устройства в среде Micro-Cap.

Ключевые слова: измерительное устройство, электродинамический ускоритель, скорость движения плазмы, дифференциальные датчики.

В различных областях науки и техники возникает задача ускорения тел до больших (порядка нескольких километров в секунду) линейных скоростей [1, 2]. В конце прошлого – начале нынешнего века круг задач, требующих высокоскоростного разгона тел, и успешно решаемых с помощью электродинамических ускорителей (ЭДУ), существенно расширился. Например, в экспериментальной физике с помощью техники высокоскоростного удара исследуются фазовые превращения вещества при сильных соударениях, анализируется возможность применения техники высокоскоростного разгона для решения задач управляемого термоядерного синтеза [3], моделируются на стендах высокоскоростные соударения метеоритных частиц и космического мусора с обшивкой космических аппаратов [4, 5] при исследовании прочностных свойств материалов. Еще одно применение ЭДУ в области космических исследований связано с запуском микрокосмических летательных аппаратов (микроКЛА). Еще одно современное применение ЭДУ связано с физическим моделированием процессов разрушения деталей проектируемого термоядерного реактора *ITER*

для решения проблем долговечности и экологической безопасности реактора [6 – 8].

Алгоритм работы устройства следующий: при пролете проводника с током около индукционных датчиков, по достижении точки экстремума сигнала, на первом датчике срабатывает пороговый элемент ПЭ и замыкает управляющие ключи, тем самым подключая измерительную цепь устройства к соответствующим парам датчиков. Далее с поступающими с датчиков сигналами производятся арифметические преобразования. Сигнал на выходе пропорционален скорости движения проводника с током [9, 10].

Автором статьи предлагается использовать метод измерения мгновенной скорости проводника с током с использованием дифференциально-суммарно-логометрической координатной функции и аппроксимацией сигнала датчиков положения обратно-экспоненциальной функцией, поскольку он обладает оптимальным набором описанных выше факторов экономичности, точности и помехозащищенности и способного обеспечить необходимую величину отношения сигнал/шум.

На схеме представлены: Д1, Д2 – индукционные датчики, ПЭ – пороговый элемент, К1, К2 – коммутаторы, СУ – суммирующее устройство, ДУ – делительное устройство, ВУ – вычитающее устройство, ДИФ – устройство дифференцирования, УУ – устройство умножения, МК – микроконтроллер.

Схема работает по следующему алгоритму: при пролете по рельсотрону объекта с источником магнитного поля, на выходе интегратора И1 возникает колоколообразный сигнал, амплитуда которого, достигая своего максимума фиксируется пороговым элементом ПЭ и запускаются коммутаторы К1 и К2, тем самым подключая датчики Д1, Д2 к измерительной цепи устройства. На блоке СУ выполняется суммирование сигналов с интеграторов по формуле:

$$U_{СУ} = U_1 + U_2,$$

а на вычитающем блоке ВУ разность этих сигналов:

$$U_{PY} = U_1 - U_2.$$

Делительное устройство формирует отношение сигналов на выходе СУ и ВУ, которое является дифференциально-суммарно-логометрической координатной функцией F :

$$F = \frac{U_1 - U_2}{U_1 + U_2}.$$

Затем координатная функция дифференцируется по времени блоком ДИФ, на выходе которого получается сигнал вида:

$$\frac{dF}{dt} \tag{1}$$

Также, сигнал эквивалентный F поступает на микроконтроллер, который формирует сигнал пропорциональный величине:

$$\frac{1}{1 - F^2}$$

Затем этот сигнал поступает на второй вход умножителя УУ. На первый вход УУ с выхода дифференциатора ДИФ поступает сигнал эквивалентный (рисунок 2), а вход 4 с микроконтроллера подаётся сигнал, эквивалентный выражению:

$$\left(\frac{1}{\sqrt{1 + d^2 \operatorname{Arctg}^2(F)}} - 1 \right) 2 \operatorname{Arctg}^2(F), \quad \text{где } d = 1/b_1$$

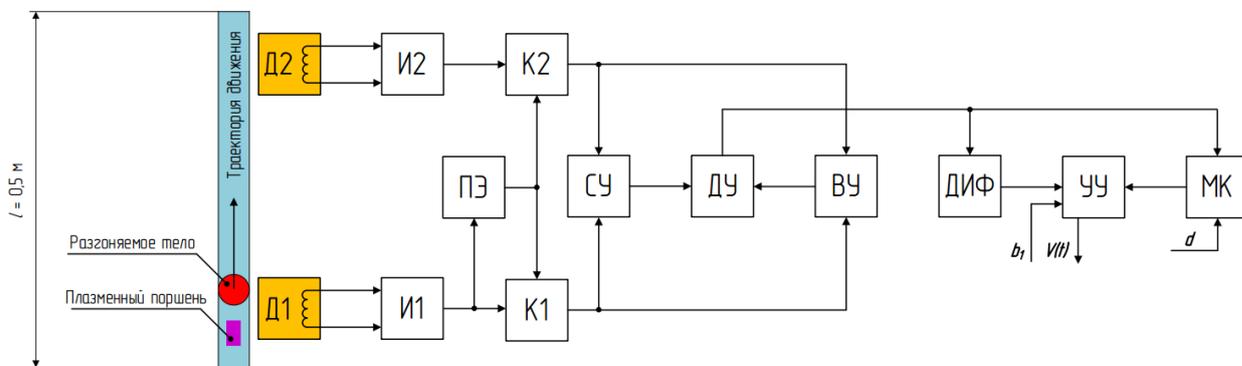


Рисунок 2. Структурная схема устройства, реализующая метод

Сигналы b_1 и d задаются в зависимости от вида реализации схемы и

при её настройке непосредственно на объекте при сборке. Таким образом, на выходе УУ, совмещенном с выходом устройства для измерения мгновенной скорости, формируется сигнал, пропорциональный текущему значению скорости v движения объекта:

$$V(t) = b1 \cdot \frac{\frac{dF}{dt} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + (l/S_e)^2 \operatorname{Arcth}^2(F)}} - 1 \right]}{2(1 - F^2) \operatorname{Arcth}^2(F)}.$$

В качестве объекта моделирования выбираем часть вычислительного блока устройства, который реализует дифференциально-суммарно-логометрическую координатную функцию F :

$$F = \frac{U1 - U2}{U1 + U2} \text{ о.е.},$$

Т.к. сигнал эквивалентный величине F (см. рисунок 3), не имеет размерности, для перевода его в вольты, необходимо задавать переходной коэффициент k , который ограничивается напряжением питания операционных усилителей. В разрабатываемой модели k принимается равным 15 В. Поскольку графически, функция F представляет собой арктангенс, то на выходе вычислительного блока сигнал будет варьироваться в диапазоне $-1 \dots 1$ о.е. Рассчитаем выходное напряжение вычислительного блока при $V1 = 5\text{В}$, $V2 = 10\text{В}$:

$$F = \frac{U1 - U2}{U1 + U2} = \frac{V2 - V1}{V2 + V1} = \frac{5 - 10}{5 + 10} = \frac{-5}{15} = 0,33 \text{ о.е.},$$

$$U_{out} = F \cdot k = 0,33 \cdot 15 = 4,95 \text{ В.}$$

где k – переходной коэффициент от о.е. к В.

Была промоделирована схема в среде *Micro-Cap* представленная на рисунке 3. На схеме представлены: $V1, V2$ – источники напряжения, имитирующие напряжение на выходе интеграторов; $R1 \dots R8$ – резисторы, задающие работу операционных усилителей, $X2, X3$ – операционные

усилители; $X1$ – виртуальный делитель сигналов, k – источник напряжения, эквивалентный k .

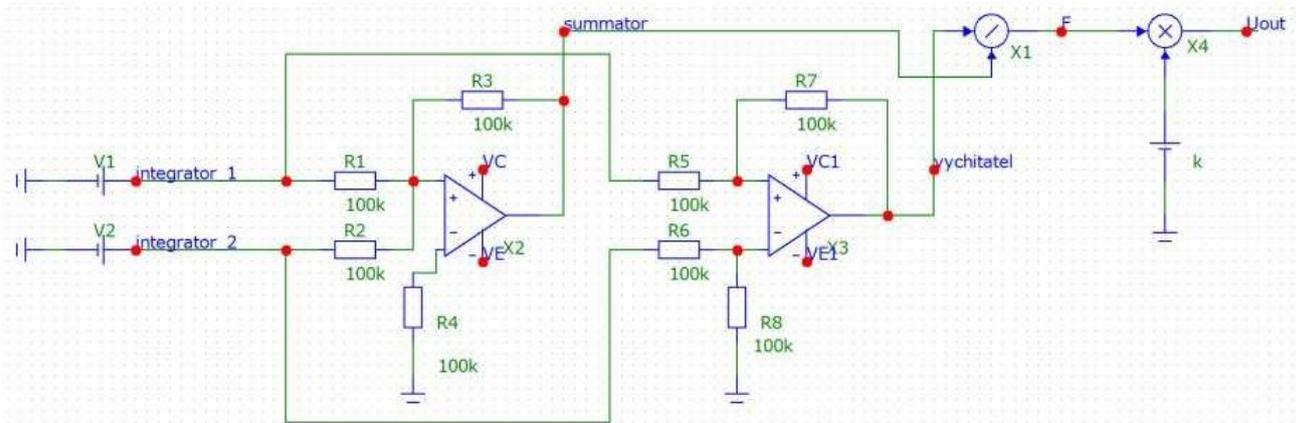


Рисунок 3. Модель вычислительного блока устройства в программе
Micro-Cap

На рисунке 4 представлены временные диаграммы, которые соответствуют расчётному значению.

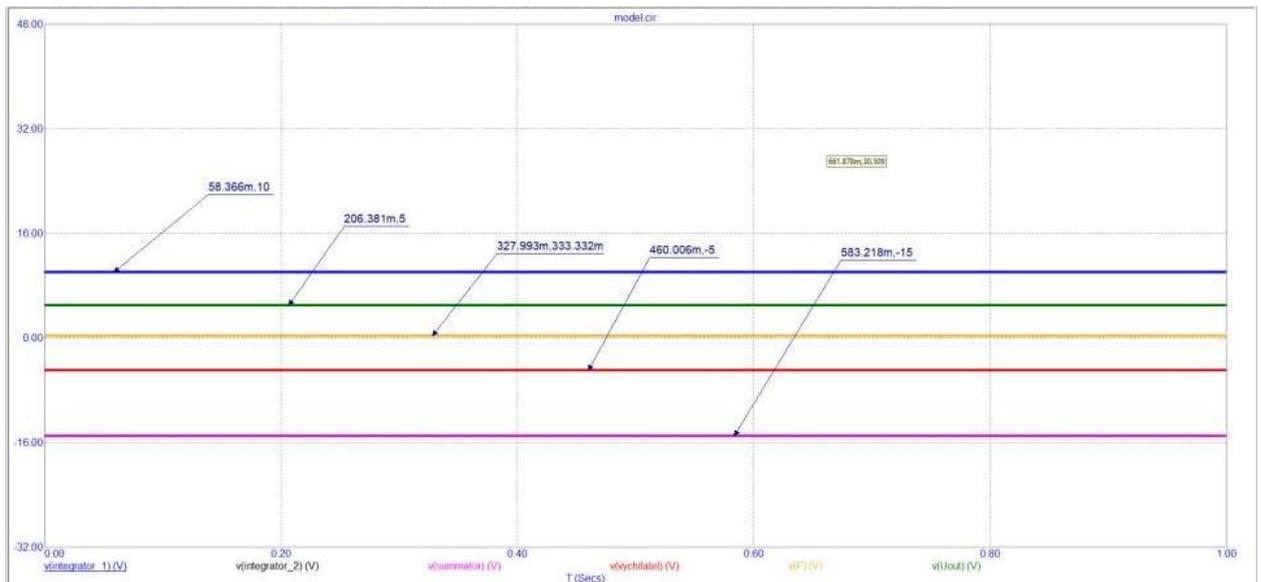


Рисунок 4. Временные диаграммы, полученные в результате
моделирования

В результате моделирования продемонстрирована работа вычислительного блока устройства для измерения мгновенной скорости движения плазмы в электродинамическом ускорителе. Выходные данные модели соответствуют расчётным значениям.

Литература

1. Колесников П.М. Электродинамическое ускорение плазмы. М.: Атомиздат, 1971. 389 с.
2. Zhang Z., Guo S., Wang H., Deng S. A New Acceleration and Deceleration Algorithm and Applications. 2012 Second International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application, 2012. pp. 121-124. doi: 10.1109/ISdea.2012.660.
3. Кудрявцев П.Г., Макринич Г.Б., Фиговский О.Л. Вариант реализации управляемого термоядерного синтеза в нестационарных условиях // Инженерный вестник Дона, 2016, №1, URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3492.
4. Ким К.К. Использование электродинамических ускорителей для авиационных и космических целей // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника, 2003. №1. С. 27-30.
5. Семкин Н.Д., Воронов К.Е., Пияков А.В., Пияков И.В. Имитация микрометеоритов с помощью электродинамического ускорителя // Приборы и техника эксперимента, 2009. №4. С. 159-165.
6. Михайлов А.А., Базуева С.А. Формирование фрактальной модели магнитоплазменного электродинамического ускорителя // Инженерный вестник Дона, 2015, №3, URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3121.
7. Linke J., Escourbiac F., Mazul I.V., Nygren R., Rödiger M., Schlosser J., Suzuki S. High heat flux testing of plasma facing materials and components— Status and perspectives for ITER related activities. Journal of Nuclear materials, 2007. Volumes 367-370. pp. 1422-1431.
8. Thirring W.E. Principles of quantum electrodynamics. Vol. 3. Academic Press, 2013. 250 p.
9. Adamovich I. V., Choi I., Jiang N., Kim J. –H., Keshav S., Lempert W.R., Mintusov E., Nishihara M., Samimy M., Uddi M. Plasma assisted ignition

and high-speed flow control: non-thermal and thermal effects. *Plasma Sources Science and Technology*, 2009. Vol. 18. Issue 3. 13 p.

10. Li S., Wang C., Wang J. Exploring Dynamic Characteristics of Multi-State Air Traffic Flow: A Time Series Approach. *IEEE Access*, 2020. Vol. 8. pp. 64565-64577. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2984510.

References

1. Kolesnikov P.M. *Elektrodinamicheskoe uskorenie plazmy* [Electrodynamic acceleration of plasma]. Moskva: Atomizdat, 1971. 389 p.

2. Zhang Z., Guo S., Wang H., Deng S. 2012 Second International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application, 2012. pp. 121-124. doi: 10.1109/ISdea.2012.660.

3. Kudryavtsev P.G., Makrinich G.B., Figovskiy O.L. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2016, №1, URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3492.

4. Kim K.K. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviatsionnaya tekhnika*, 2003. №1. pp. 27-30.

5. Semkin N.D., Voronov K.E., Piyakov A.V., Piyakov I.V. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 2009. №4. pp. 159-165.

6. Mikhaylov A.A., Bazueva S.A. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2015, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3121.

7. Linke J., Escourbiac F., Mazul I.V., Nygren R., Rödigg M., Schlosser J., Suzuki S. *Journal of Nuclear materials*, 2007. Volumes 367-370. pp. 1422-1431.

8. Thirring W.E. *Principles of quantum electrodynamics*. Vol. 3. Academic Press, 2013. 250 p.

9. Adamovich I. V., Choi I., Jiang N., Kim J. –H., Keshav S., Lempert W.R., Mintusov E., Nishihara M., Samimy M., Uddi M. *Plasma Sources Science and Technology*, 2009. Vol. 18. Issue 3. 13 p.

10. Li S., Wang C., Wang J. *IEEE Access*, 2020. Vol. 8. pp. 64565-64577. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2984510.