

УДК 537.533; 621.384

**СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ АППАРАТУРЫ ДИАГНОСТИКИ  
ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА****С.Н. АБРАМЕНКО, канд. техн. наук, доц. Ю.П. ГОЛУБЕВ,****П.Н. СОЛДАТЕНКО****(Полоцкий государственный университет);****канд. техн. наук, доц. Д.А. АНТОНОВИЧ****(Витебский государственный университет им. П.М. Машерова)**

*Численное моделирование позволяет сузить набор параметров при разработке электронно-оптических систем для получения пучка с определенными характеристиками. Однако для практической доработки (оптимизации) электронно-оптических систем требуется соответствующая аппаратура, позволяющая оценивать качество пучка на основе сравнения степени влияния различных внешних факторов на электронно-оптические параметры электронного пучка – расходимость пучка, распределение плотности тока по сечению пучка, минимально возможный диаметр пучка. При этом вследствие многофакторности условий формирования электронных пучков целесообразно использовать комплексные характеристики, для расчета которых используются различные аппаратно-программные комплексы. На повышение точности работы таких комплексов существенное влияние оказывает взаимное расположение системы датчиков диагностирующей аппаратуры и диагностируемого электронного пучка. В работе представлено описание и принципиальная схема разработанной системы автоматического позиционирования диагностической аппаратуры, применение которой при исследовании распределения плотности тока электронного пучка позволяет исключить ошибку, обусловленную неправильным расположением сканирующих датчиков относительно измеряемого электронного пучка.*

**Ключевые слова:** диагностика параметров электронного пучка, качество электронного пучка, диагностирующая аппаратура, система позиционирования.

**Введение.** Несмотря на то, что применение электронно-лучевых технологий по сравнению с традиционными способами сварки может обеспечить более высокий уровень экономических показателей и эксплуатационных свойств изделий из разнородных материалов [1–3], их внедрение в производство сдерживается по ряду причин. Одной из таких причин является то, что при оценке технологической пригодности электронного пучка для реализации конкретного технологического процесса, как правило, ограничиваются сравнением плотности мощности пучка и энергии электронов в пучке. В то же время на стадии проектирования электронно-лучевых устройств, а также при разработке новых технологий возникает необходимость получать, сравнивать и корректировать как более частные параметры (расходимость, распределение плотности тока, электронную температуру плазмы, предельный диаметр пучка), так и комплексные характеристики (эмиттанс, яркость), позволяющие сравнивать пучки, априори определяя их качество [4]. Для оценки каждой из частных характеристик разработаны методы, позволяющие исследовать их в зависимости от внешних условий. Однако все эти параметры взаимосвязаны, и изменение одного из них приводит к изменению другого. Такая ситуация делает затруднительным сравнение качества пучков на основе одного из параметров, поэтому для получения целостного представления о качестве пучков и их сравнительного анализа целесообразно использовать комплексные характеристики и соответствующую аппаратуру для их измерения и автоматической обработки информации (построения трехмерных поверхностей, определения фазового портрета пучка, расчета эмиттанса и яркости). Подобный комплекс, включающий электромеханическое устройство, систему его управления и соответствующее программное обеспечение, может быть использован как для оптимизации разрабатываемых конструкций источников заряженных частиц, так и для других лучевых устройств с целью повышения их технологической эффективности и качества пучков.

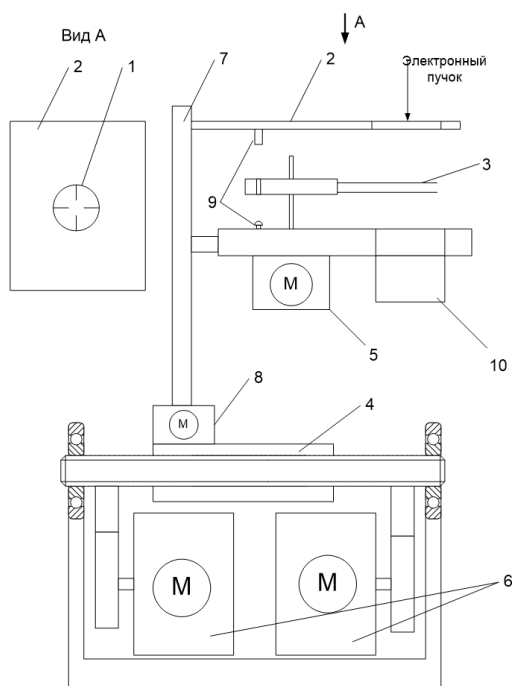
**Основная часть.** На кафедре физики Полоцкого государственного университета был разработан подобный комплекс (рисунок 1), включающий электромеханический измерительный блок для непосредственного измерения параметров электронного пучка, компьютерную систему обработки и компонент для визуализации полученных результатов, ответственные за оцифровку измеренных данных их обработку и расчет комплексных характеристик электронного пучка (яркости, эмиттанса и угла расходимости), а также визуализацию полученных результатов. Так как электромеханический блок осуществляет непосредственное измерение распределения плотности тока электронов, сформированных в источнике электронов, то корректность и точность итоговых результатов во многом определяется работой электромеханического измерительного блока, поскольку обработка и визуализация полученных результатов, осуществляемая на последующих этапах, зависит от адекватности применяемого для обработки математического аппарата.

Среди факторов, влияющих на правильность измерения параметров электронного пучка, важную роль играет точность установки диагностирующей аппаратуры. Ниже представлено описание системы позиционирования диагностирующей аппаратуры, позволяющей при первоначальной примерной установке в автоматическом режиме выводить ее на точную позицию для измерения распределения плотности тока электронного пучка и поддерживать такое состояние с требуемой (заданной) точностью.



Рисунок 1. – Структурная схема измерительного комплекса

Структурная схема электромеханического измерительного блока диагностирующей аппаратуры приведена на рисунке 2.



- 1 – датчик системы позиционирования;  
 2 – пластина; 3 – система двойного сканирующего зонда; 4 – двухпозиционный координатный стол;  
 5 – двигатель вращения; 6 – двигатели позиционирования; 7 – вал вертикального перемещения;  
 8 – двигатель вертикального перемещения;  
 9 – оптопара; 10 – цилиндр Фарадея

Рисунок 2. – Структура электромеханического измерительного блока диагностирующей аппаратуры

Пучок электронов, проходящий через металлическую пластину 2 из тугоплавкого материала (тантал) с отверстием, снабженным датчиками системы позиционирования 1 (см. рисунок 2), принимается в заземленный цилиндр Фарадея 10 [5]. Под пластиной находится система двойного сканирующего зонда с датчиками, разнесенными в пространстве по вертикали и смещенными на угол друг относительно друга. Зонд закреплен на диске, приводимом во вращательное движение двигателем 5. Каждый из датчиков системы двойного сканирующего зонда представляет собой проволоку, изготовленную из тугоплавкого материала (нихром, вольфрам) диаметром 0,1 мм и длиной 45 мм. Такой выбор обусловлен критериями теплостойкости (нагрев до 1000 К), механической прочности и жесткости для недопущения провисания во время остановки и разгона двигателя. Каждый из зондов 3 жестко прикреплен к диску. Для исключения влияния электронного пучка на двигатель вращения 5 он размещен под защитной пластиной, в которой закреплен цилиндр Фарадея 10. Система двойного вращающегося зонда изолирована от корпуса диагностирующей аппаратуры. Двигатель установлен относительно пластины таким образом, что система двойного сканирующего зонда измеряет плотность тока электронного пучка, прошедшего отверстие в пластине 2, и в рабочей области плоскость расположения зондов можно считать нормальной к плоскости распространения тока диагностируемого электронного пучка. С постоянной скоростью проволоочки пересекают электронный пучок перпендикулярно оси и отбирают небольшую часть его тока. Сигнал, возникающий при пересечении проволочками пучка, представляет собой временную функцию напряжения. Двигатель

и пластина закреплены на стойке 7 и имеют возможность вертикального перемещения для поиска кроссовера пучка. Управление вращением и передача сигнала об измеряемых параметрах осуществляется посредством промышленного логического контроллера (ПЛК, на рисунке 2 не показан). Вся конструкция установлена на двухпозиционный координатный стол 4 и способна перемещаться в четырех направлениях горизонтальной плоскости, ортогональной к плоскости распространения электронного пучка. Пучок электронов проходит через датчик системы позиционирования и формирует управляющий сигнал для системы управления позиционированием, затем попадает на ПЛК, управляющий сигнал с которого поступает на двигатели системы позиционирования 6 и производит центрирование аппаратуры.

На рисунке 3 приведена структурная схема системы управления позиционированием диагностирующей аппаратуры, входные сигналы для которой формируют датчики 1 (см. рисунок 2).

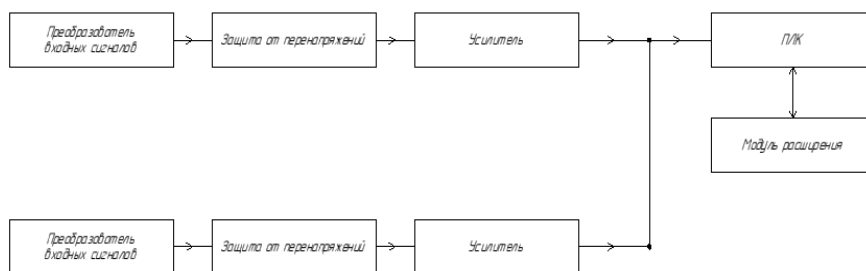


Рисунок 3. – Структурная схема автомата управления фокусировкой ионного луча

В качестве усилителя входных сигналов применялся каскад, включающий в себя операционный усилитель с высоким коэффициентом усиления и частотой компенсации. Данный каскад изображен на рисунке 4. Его принцип действия основан на том, что в блок преобразователя входных сигналов, включающий в себя разъем XS1 и два резистора R1, R5, с датчиков системы позиционирования поступает сигнал, проходит через блок защиты от напряжений, включающий в себя диоды VD1, VD5, VD6, конденсатор C3 и резисторы R9, R10, а затем попадает в блок операционного усилителя DA2.1, после чего поступает на ПЛК, в качестве которого применялся 6ED1052-1CC08-0BA0 Logo! 24CE фирмы Siemens [6].

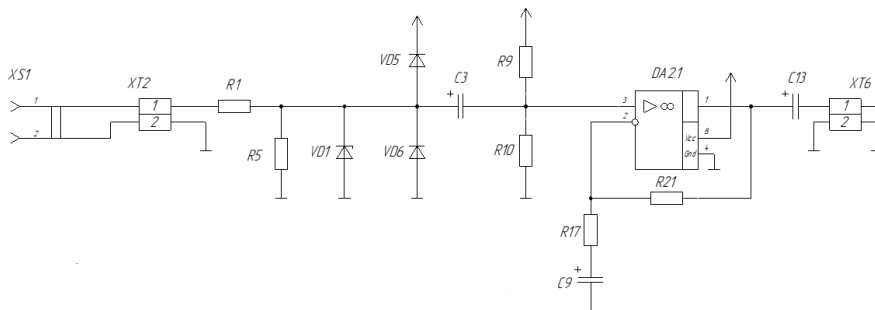


Рисунок 4. – Схема усилителя входных сигналов

На рисунке 5 изображена разработанная схема электрическая принципиальная системы управления позиционированием диагностической аппаратуры.

По величине сигнала рассогласования ПЛК формирует и передает управляющие сигналы на соответствующие двигатели позиционирования 6 (см. рисунок 2) в автоматическом режиме. Предусмотрен также и ручной режим управления по команде оператора. Для этого система управления снабжена дисплеем 6ED1055-4MH00-0BA1 Logo! TDE фирмы Siemens [7], где отображаются основные технические характеристики работы системы позиционирования и оператор формирует команды управления в ручном режиме. При разработке схемы также использовались следующие готовые модули, выбор которых был обусловлен их совместимостью с выбранным ПЛК и подходящими техническими характеристиками:

- модуль расширения для ПЛК 6ED1055-1CB10-0BA2 LOGO! DM16 24 фирмы Siemens [8] для обеспечения устройства нужным количеством входов и выходов;
- в качестве шагового двигателя применялся ST57-56 фирмы Leadshine [9] с драйвером DM556E фирмы Leadshine [10];
- в качестве операционного усилителя применялся сдвоенный усилитель марки LM358AN от National Instruments в корпусе SOIC8 [11];
- выпрямительные диоды марки RHRP30120 фирмы On Semiconductor [12];
- стабилитроны марки 1SMB5929BT3G фирмы On Semiconductor [13].

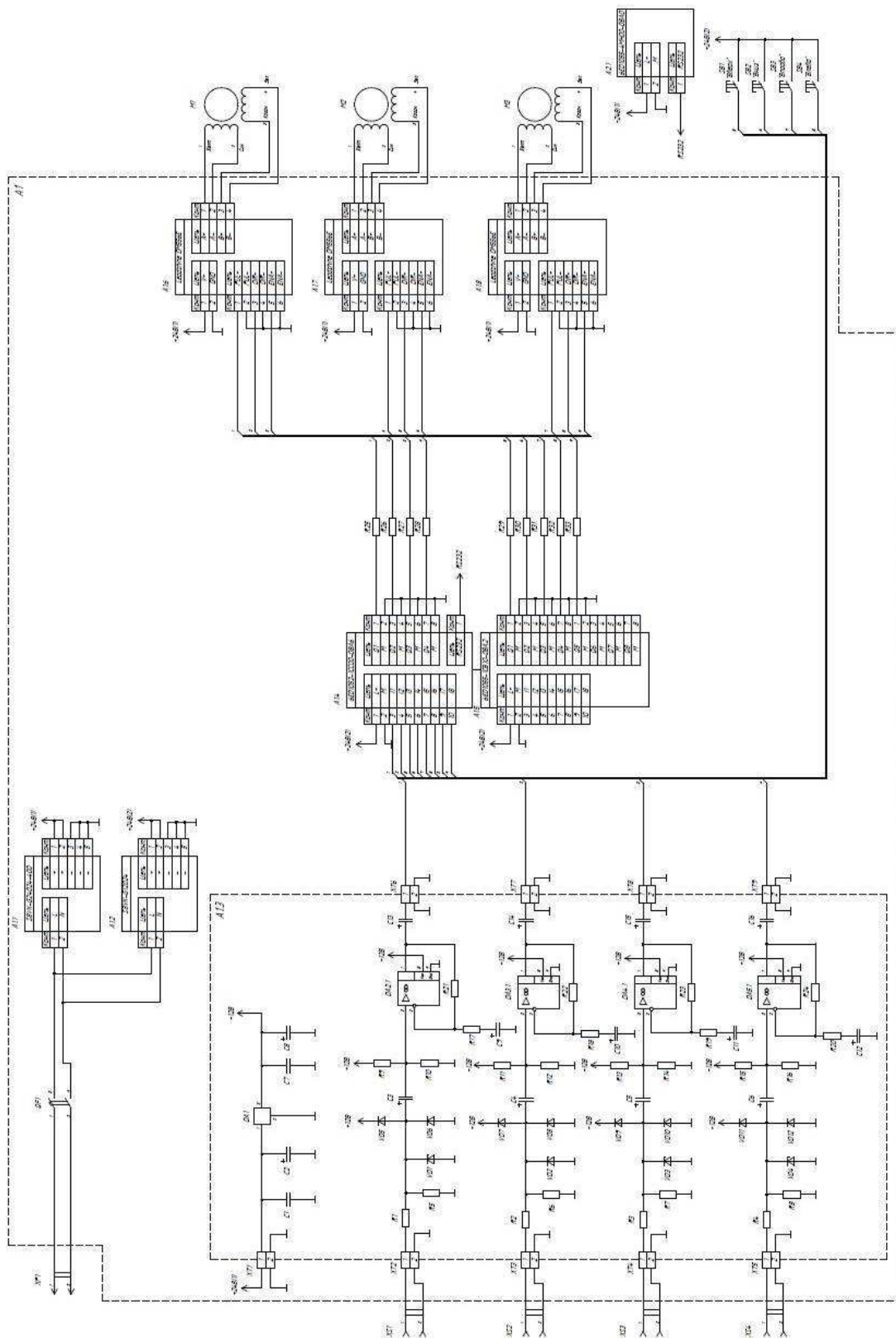


Рисунок 5. – Схема электрическая принципиальная системы управления позиционирования диагностической аппаратуры

**Заключение.** Проведенные эксперименты показали, что система позволяет выполнять позиционирование системы диагностики с точностью до 0,5 мм, начальное время позиционирования – до 1 с. Это позволяет сделать вывод о возможности применения разработанной системы позиционирования диагностической аппаратуры в составе аппаратно-программного комплекса для проведения комплексной диагностики электронных пучков.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шиллер, З. Электронно-лучевые технологии / З. Шиллер, У. Гайзиг, З. Панцер. – М. : Энергия, 1980. – 528 с.
2. Плазменные эмиссионные системы для электронно-лучевых технологий : ч. 1 / Д.А. Антонович [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2016. – № 12. – С. 37–44.
3. Плазменные эмиссионные системы для электронно-лучевых технологий : ч. 2 / Д.А. Антонович [и др.] – Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2017. – № 4 – С. 45–51.
4. Молоковский, С.И. Интенсивные электронные и ионные пучки / С.И. Молоковский, А.Д. Сушков. – Л. : Энергия, 1972.
5. Алямовский, И.В. Электронные пучки и электронные пушки / И.В. Алямовский. – М. : Советское радио, 1966. – 456 с.
6. Техническая документация по 6ED1055-1CB10-0BA2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.siemens-pro.ru/logo/6ED1055-1CB10-0BA2.html>. – Дата доступа: 20.12.2020.
7. Техническая документация по LOGO! TDE 6ED1 055-4MH00-0BA1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.saa.su/product/siemens-logo-tde-6ed1-055-4mh00-0ba1>. – Дата доступа: 20.12.2020.
8. Техническая документация по 6ED1055-1CB10-0BA2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.siemens-pro.ru/logo/6ED1055-1CB10-0BA2.html>. – Дата доступа: 20.12.2020.
9. Техническая документация по шаговому двигателю ST57-56 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://darxton.ru/catalog\\_item/shagovyy-dvigatel-st57-56-flanets-57mm-nema23/](https://darxton.ru/catalog_item/shagovyy-dvigatel-st57-56-flanets-57mm-nema23/). – Дата доступа: 20.12.2020.
10. Техническая документация на цифровой настраиваемый драйвер для шагового двигателя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://darxton.ru/catalog\\_item/dm556e-leadshine-napryazhenie-20-50-v-tok-do-5-6-a/](https://darxton.ru/catalog_item/dm556e-leadshine-napryazhenie-20-50-v-tok-do-5-6-a/). – Дата доступа: 20.12.2020.
11. Техническая документация на операционный усилитель LM358AN [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.chipdip.ru/product/lm358an-norb>. – Дата доступа: 20.12.2020.
12. Техническая документация на выпрямитель RHRP30120 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.mouser.com/ProductDetail/?qs=UeXq8qLVREE4mVP09LVybw%3D%3D>. – Дата доступа: 20.12.2020.
13. Техническая документация на стабилитрон 1SMB5929BT3G [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.mouser.com/ProductDetail/ON-Semiconductor/1SMB5929BT3G?qs=vLkC5FC1VN%2FFUr7OS2Q1Aw%3D%3D>. – Дата доступа: 20.12.2020.
14. Humphries, S.Jr. Charged Particle Beams / S.Jr.Humphries. – New York : John Wiley and Sons, 2002. – 819 p.
15. Плазменные процессы в технологических электронных пушках / М.А. Завьялов [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 256 с.
16. Лоусон, Дж. Физика пучков заряженных частиц / Дж. Лоусон ; пер. с англ. А.В. Агафонова. – М. : Мир, 1980. – 438 с.

Поступила 24.12.2020

POSITIONING SYSTEM FOR DIAGNOSTIC EQUIPMENT  
OF ELECTRON BEAM PARAMETERS

S. ABRAMENKO, Yu. GOLUBEV, P. SOLDATENKO, D. ANTONOVICH

*Numerical simulation allows you to narrow the set of parameters in the development of electron-optical systems to obtain a beam with certain characteristics. However, for practical fine-tuning (optimization) of electron-optical systems, appropriate equipment is required, which makes it possible to evaluate the quality of the beam based on comparing the degree of influence of various external factors on the electron-optical parameters of the electron beam - beam divergence, current density distribution over the beam cross section, and the minimum possible beam diameter. In this case, due to the multifactorial nature of the conditions for the formation of electron beams, it is advisable to use complex characteristics, for the calculation of which various hardware and software complexes are used. The increase in the accuracy of the operation of such complexes is significantly influenced by the relative position of the system of sensors of the diagnostic equipment and the electron beam being diagnosed. The paper presents a description and a schematic diagram of the developed system for automatic positioning of diagnostic equipment, the use of which in the study of the distribution of the current density of the electron beam eliminates the error caused by the incorrect location of the scanning sensors relative to the measured electron beam.*

**Keywords:** diagnostics of the parameters of the electron beam, the quality of the electron beam, diagnostic equipment, positioning system.