

ЭЛЕКТРОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ В ТРАКТЕ ИНЖЕКЦИИ ЦИКЛИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ

В. А. КОЧЕГУРОВ, Н. В. ТРИХАНОВА, П. М. ЩАНИН

(Представлена научным семинаром факультета автоматики и
вычислительной техники)

В циклических ускорителях на высокие энергии, как правило, применяется внешняя инжекция частиц. При этом частицы до энергии инжекции ускоряются дополнительным ускорителем-инжектором, затем по тракту вводятся в камеру для ускорения. Обычно к параметрам вводимого пучка частиц предъявляются определенные требования, которым не всегда удовлетворяют частицы на выходе ускорителя инжектора. Поэтому на пути частиц от инжектора до ускорителя устанавливаются различные формирующие системы: квадрупольные линзы, магнитные корректоры, отклоняющие магнитные и электростатические устройства. Аналитический расчет таких систем в общем случае возможен, но требует проведения громоздких вычислений.

Для расчета и выбора оптимальной схемы формирования и юстировки электронного пучка нами применена аналоговая математическая машина МНБ-1.

В качестве примера рассмотрим методику расчета тракта инжекции, предназначенного для проведения электронного пучка, состоящего из 2 пар квадрупольных линз (1, 3, 5, 7 участки, рис. 1), двух корректирующих линз (участки 9, 11) и трех электрических конденсаторов, компенсирующих влияние внешнего магнитного поля (участок 14). В промежутках между линзами электроны отклоняются внешним магнитным полем $B_z(y)$. Зависимость напряженности магнитного поля B_z от координаты y показана на рис. 2.

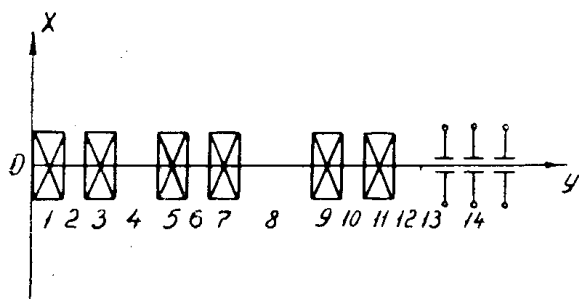


Рис. 1. Тракт инжекции из 14 участков.

Исходными данными для решения задачи являются энергия частиц, поперечные размеры и угловая расходимость электронного пучка на входе тракта инжекции. Требуется определить основные параметры формирующей системы, обеспечивающей на выходе тракта пучок с заданным поперечным сечением и угловой расходимостью.

Выберем систему координат, в которой ось y совпадает с направлением движения электронов. Уравнения траектории электронов в ли-

нейном приближении в вертикальной плоскости xu для участков $1 \div 14$ имеют вид:

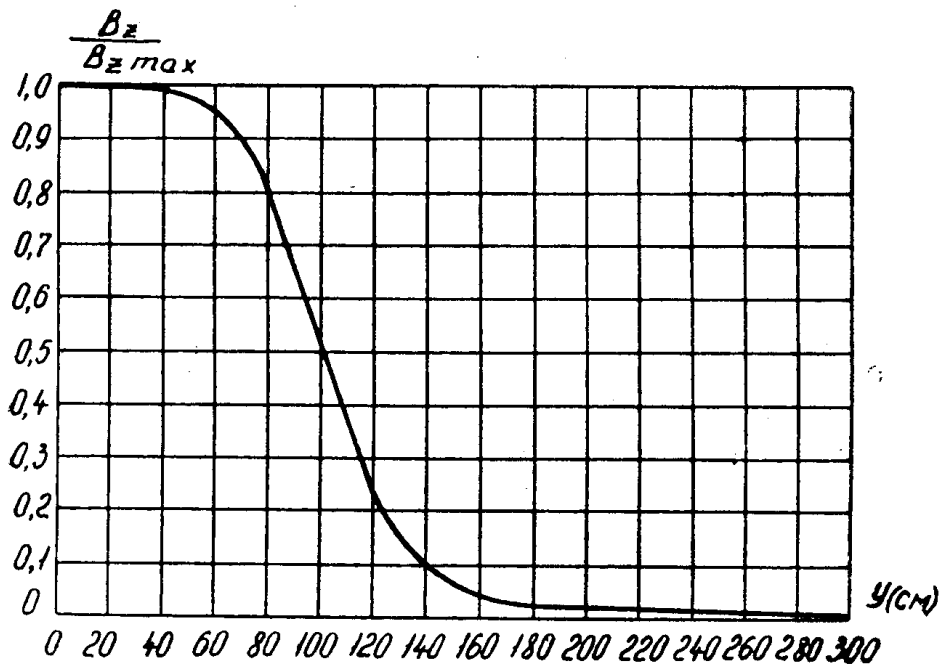


Рис. 2. Зависимость B_z/B_{zmax} от y

Участок	Уравнение
1, 3, 5, 7	$\frac{d^2x}{dy^2} + kx = 0, \quad (1)$ где $k = k_1, -k_2, +k_3, -k_4$ на 1, 3, 5, 7 участках соответственно
2, 4, 6, 8, 10, 12	$\frac{d^2x}{dy^2} - a = 0. \quad (2)$
9, 11	$\frac{d^2x}{dy^2} + b = 0,$ где $b = b_1$ на участке 9, $b = b_2$ на участке 11. (3)
13	$\frac{d^2x}{dy^2} + Aa(y) = 0. \quad (4)$
14	$\frac{d^2x}{dy^2} - [Bb(y) - Aa(y)] = 0, \quad (5)$ где A и B — const

Выбор коэффициентов $k_1 \div k_4, b_1, b_2$ из условия требований к пучку можно осуществить, решая последовательно дифференциальные уравнения для участков $1 \div 14$ при некотором наборе коэффициентов. Если получены неудовлетворительные значения координаты x и производной $\frac{dx}{dy}$ на выходе тракта, необходимо изменить коэффициенты $k_1 \div k_4, b_1, b_2$ и решить уравнения для нового набора коэффициентов; такой процесс вычислений необходимо продолжать до получения требуемого

решения. Уравнения (1) ÷ (5) имеют аналитическое решение, но поскольку для каждого набора коэффициентов необходимо решать 14 дифференциальных уравнений с различными начальными условиями, процесс подбора коэффициентов является трудоемким.

Для решения уравнений (1) ÷ (5) нами использовалась электронная моделирующая установка МНБ-1. Поскольку при использовании моделирующей установки для решения уравнения на каждом участке необходимо набирать свою структурную схему и задавать начальные условия, было разработано специальное программное устройство для модели МНБ-1. Структурная схема модели изображена на рис. 3. Напряжение U_2 в точке B пропорционально перемещению электрона вдоль оси, напряжение в точке A — изменению угла наклона траектории электрона. При замкнутых контактах $4P_1$ и $3P_1$ реле P_1 создается схема для решения уравнения (1), при замкнутом контакте $3P_2$ реле P_2 образуется схема для решения уравнения (2), при замкнутых контактах $4P_3$ и $3P_3$ имеем схему для решения уравнения (1) и так далее.

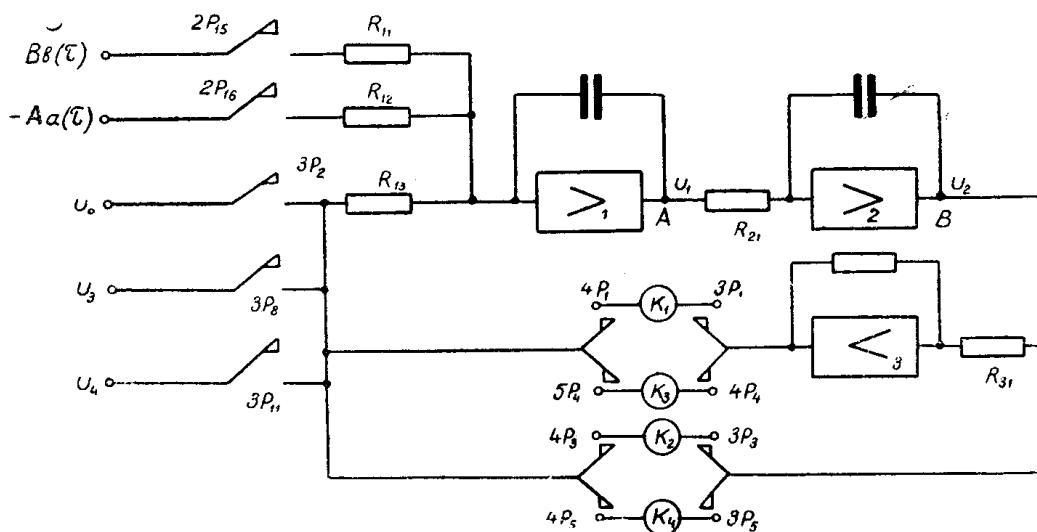


Рис. 3. Структурная схема для тракта инъекции из 14 участков.

Управление работой реле производится шаговым искателем. Используется шаговый искатель блока переменных коэффициентов типа СБ-3 модели ИПТ-5. В обмотку шагового искателя подается импульсное напряжение $+26$ в частотой 1 гц. На движок искателя подается $+26$ в.

Для построения программного устройства, рассчитанного на 400 сек работы, использовано 4 блока СБ-3.

Принципиальная схема программного устройства изображена на рис. 4. Пуск шагового искателя ШИ1 осуществляется контактом $1P$ реле, расположенного в интегрирующем усилителе 1; это реле срабатывает в момент начала процесса интегрирования. На первой ламели шагового искателя срабатывает реле P_1 и подготавливает схему для решения уравнения (1). На десятой ламели срабатывает реле P_2 , подготавливает схему для решения уравнения (2), при этом нормально замкнутый контакт реле P_2 — $2P_2$ разрывает цепь реле P_1 и т. д. На сотом шаге первого шагового искателя срабатывает реле P_6 , которое своим контактом $3P_6$ пускает второй шаговый искатель. Аналогично осуществляется пуск третьего и четвертого шаговых искателей.

Погрешность, вносимая в расчет за счет инерционности реле и шагового искателя, составляет не более 0,5%.

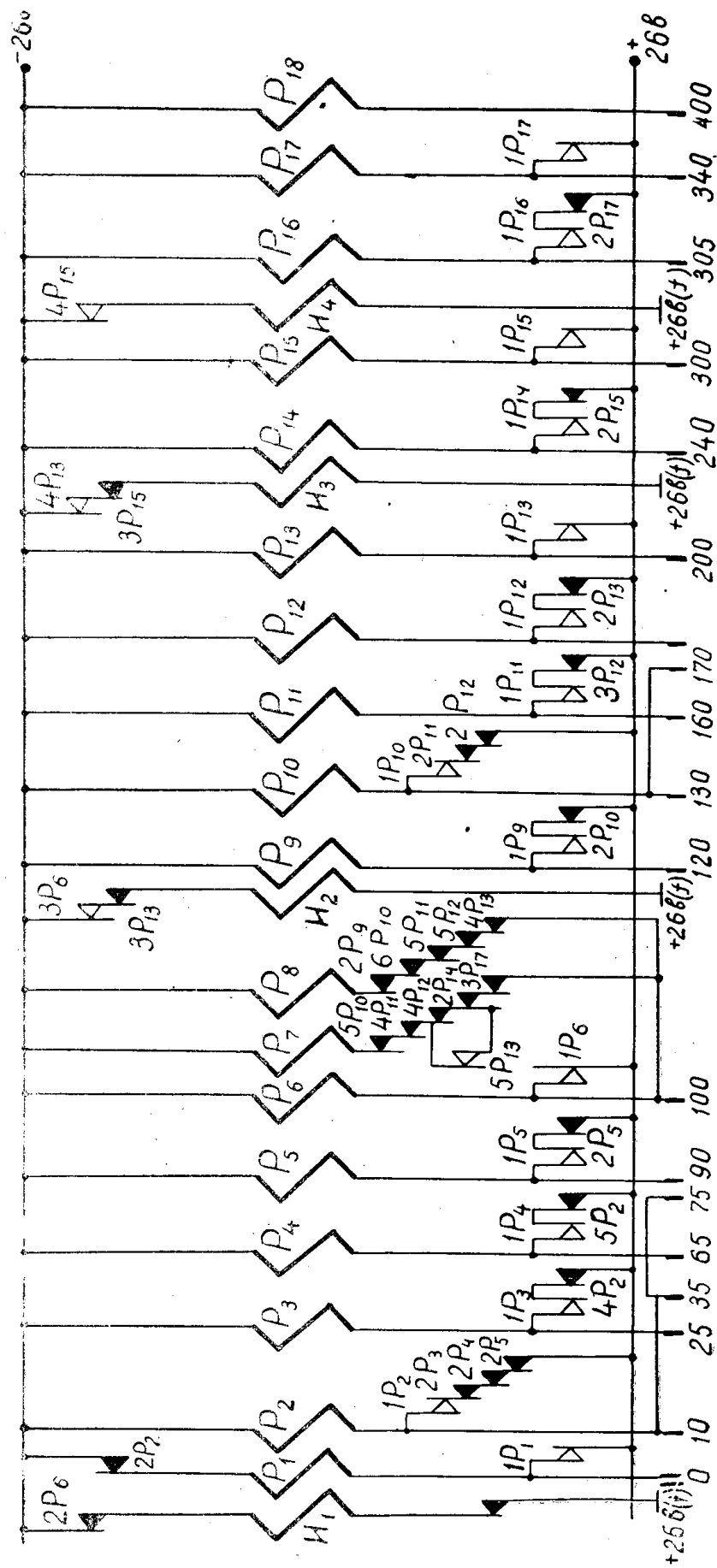


Рис. 4. Схема программного устройства.

Иногда бывают заданными конструкция тракта инжекции, а также тип формирующей системы, и имеется возможность в некоторых пределах регулировать параметры частиц на входе в тракт инжекции. В таких случаях для определения характеристик элементов формирующей системы, обеспечивающей заданные параметры пучка на выходе тракта, целесообразно производить расчет траектории частиц с «конца», пользуясь свойством обратимости электронно-оптической системы. Применение аналоговой машины с соответствующим программным устройством значительно облегчает решение данной задачи.

В качестве начальных условий в решающих усилителях устанавливаются значения координаты и угла наклона траектории, требуемые на выходе формирующей системы, а направление магнитных полей меняется на противоположное. В результате решения определяются необходимые входные параметры пучка (размеры и угол расходимости). Таким образом, решение дает ответ на вопрос: какие параметры должен иметь пучок на входе определенной формирующей системы, чтобы на выходе получить пучок с заданными параметрами.

Указанным способом, в частности, были установлены необходимые входные параметры электронного пучка и выбраны характеристики формирующей системы, состоящей из двух квадрупольных линз (участки 4, 6 на рис. 5) и корректора (участок 2, рис. 5) при заданных вы-

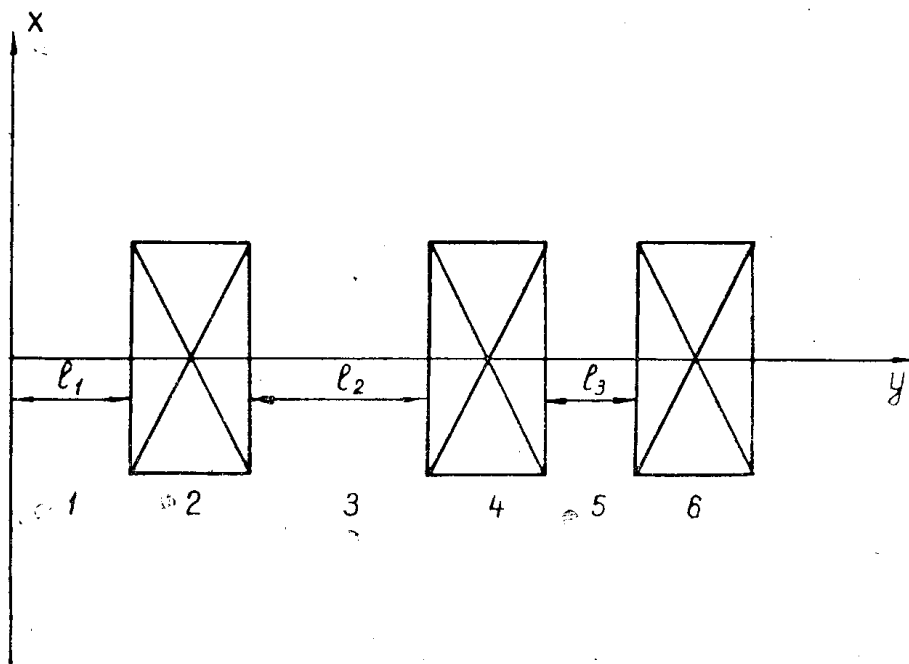


Рис. 5. Тракт инжекции из 6 участков.

ходных параметрах электронного пучка. В промежутках между квадрупольными линзами и корректором на электроны действует неоднородное магнитное поле. Поскольку расстояние между квадрупольными линзами и корректором заданы, исправления угловой расходимости и размеров пучка приходится добиваться регулировкой входных параметров. В данном случае легко определяются коэффициенты k квадрупольных линз и ток в корректоре, а также, какие параметры должен иметь пучок на входе формирующей системы. Структурная схема модели для расчета траектории электронов в горизонтальной плоскости рассматриваемого тракта изображена на рис. 6, где 1, 2 — операционные усилители в режиме интегрирования; 3 — операционный усилитель

в режиме инвертирования; κ_{21} , κ_{21}' , l_2 , l_4 — блоки постоянных коэффициентов; 4, 5 — блоки переменных коэффициентов, на которых набрана зависимость магнитного поля от координаты y . Напряжение U_0 изображает действие магнитного поля корректора. При решении уравнения на первом участке замкнуты контакты $3P_1$ реле P_1 и $2P_4$ реле P_4 ; на

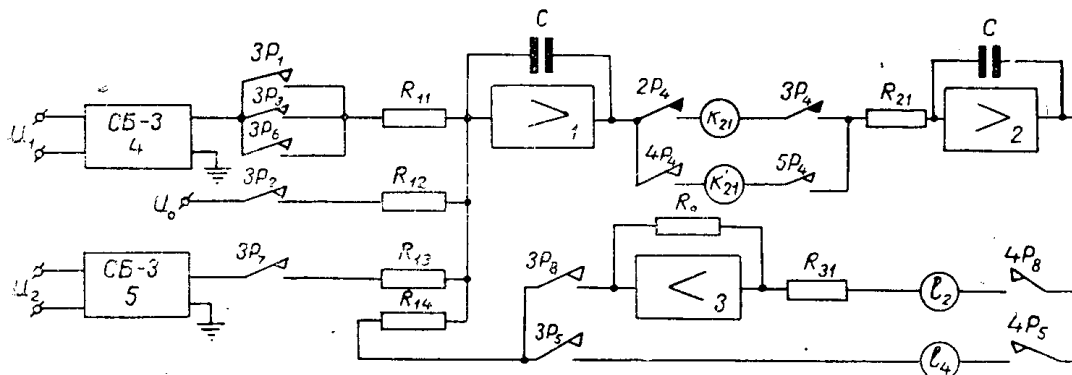


Рис. 6. Структурная схема для тракта инжекции из 6 участков.

втором участке замкнуты контакты $3P_2$ реле P_2 , $2P_4$ и $3P_4$ реле P_4 ; на третьем участке замкнуты контакты $4P_4$, $5P_4$ реле P_4 и $3P_5$, $4P_5$ реле P_5 и т. д. Работой реле управляет шаговый искатель программного устройства.

Большую помощь оказывает применение аналоговых вычислительных машин при настройке управляющего магнитного поля в циклических ускорителях. На электронной модели достаточно просто можно производить расчет составляющих гармонического ряда Фурье азимутального распределения магнитного поля по замкнутой орбите ускоряемых частиц, а также реальную траекторию частиц на первых оборотах.

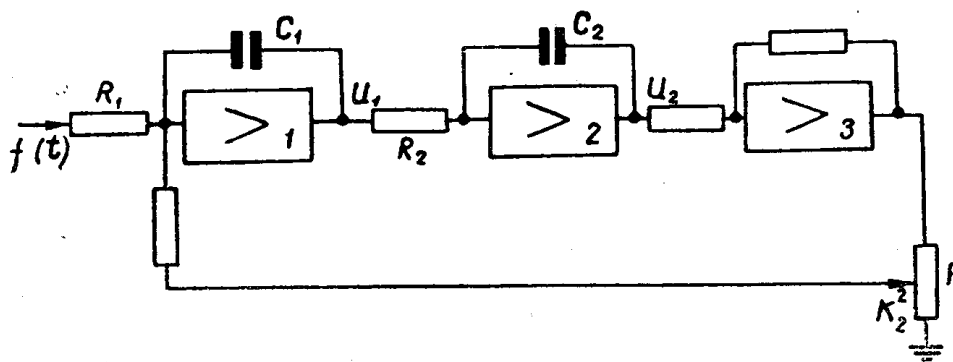


Рис. 7. Структурная схема для определения коэффициентов Фурье.

Для гармонического анализа азимутального распределения поля используется структурная схема, изображенная на рис. 7. Известно [2], что если на вход схемы подается функция $f(t)$ с периодом T , то в момент времени $t=T$ напряжения U_1 , U_2 определяются по формулам:

$$U_1 = -\frac{T}{2R_1C_1} a_n;$$

$$U_2 = \frac{T^2}{4\pi nR_1R_2C_1C_2} \cdot b_m,$$

где a_n и b_n — коэффициенты Фурье:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos\left(\frac{2\pi n}{T} \cdot t\right) dt,$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin\left(\frac{2\pi n}{T} \cdot t\right) dt.$$

При этом период собственных колебаний контура должен удовлетворять условию

$$\omega_n = \frac{2\pi n}{T}.$$

Для воспроизведения функции $f(t)$ можно использовать электро-механический блок нелинейности НБ-5 в режиме „точно“.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Good, O. Piccioni. Rev. Scient. Instrum. 31, 10, 1035 (1960).
 2. G. F. Newell, W. R. Geddes. Electronic Engineering. 33, IX (1960).
-