

УДК 621.318.2

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ДЕФОКУСИРУЮЩИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В МАГНИТНЫХ ФОКУСИРУЮЩИХ СИСТЕМАХ С ОДНОРОДНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

И. Н. Афонин, А. Ю. Кивокурцев, А. М. Самылкин

Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Алмаз»,
410033, Саратов, ул. Панфилова, д. 1

Статья поступила в редакцию 14 марта 2019 г.

Аннотация. В данной статье авторы рассматривают влияние дефокусирующих составляющих магнитного поля на фокусировку электронных пучков (в том числе расположенных на удалении от оси) магнитной фокусирующей системой с однородным магнитным полем. Представлены критерии допустимого уровня дефокусирующих факторов: поперечной составляющей магнитной индукции и факторов, связанных с неоднородностью аксиального магнитного поля. Также показана конструкция магнитной фокусирующей системы, позволяющая снизить влияние дефокусирующих факторов.

Ключевые слова: постоянные магниты, магнитная индукция, фокусирующая система, ЛБВ, электронный поток.

Abstract. In this article, the authors consider the influence of the defocusing factors of the magnetic field on the focusing of electron beams in multipath electronic devices. The authors established the dependence of the permissible level of defocusing magnetic induction components on the linear dimensions and position of the channels. It was concluded that the smaller the channel radius and the longer the channel, the more stringent the requirements for the level of the transverse component of the magnetic induction. To improve the focusing properties of a magnetic focusing system, one should strive to reduce the average, and not the maximum level of the defocusing components along the length of the channel. Based on the known formulas for calculating the radial component of magnetic induction at a distance from an axially symmetric magnetic field, the maximum permissible level

of heterogeneity of the axial component of magnetic induction is determined depending on the specified parameters of the magnetic focusing system and the device. The role and significance of random and regular factors in the formation of the level of defocusing components are determined, the necessary mathematical relationships are derived. The design of a magnetic focusing system for a multibeam device, which makes it possible to reduce the level of the defocusing component of the magnetic induction on the electron beam channels remote from the axis, is presented and theoretically justified.

Keywords: permanent magnets, magnetic induction, focusing system, TWT, electron flow.

При размещении пролетных каналов вдоль оси МФС появление дефокусирующих составляющих магнитной индукции обусловлено, главным образом, асимметрией размещения и неоднородностью магнитов, а также асимметрией размещения и погрешностями изготовления магнитопроводов системы. [1] Уменьшение дефокусирующих составляющих магнитной индукции обеспечивается конструктивно-технологическими приемами: симметричным размещением магнитов и магнитопроводов относительно оси МФС, наклеиванием на поверхности магнитов небольших пластин или деталей из магнитомягкого или магнитотвердого материала («пиявок»), специальным подбором магнитов по намагниченности, применением выравнивающих магнитные потенциалы магнитопроводов и т.п. Наиболее низкие уровни дефокусирующих составляющих $B_{\text{п}}$ магнитной индукции обычно удается получать применением так называемых «выпрямителей магнитного поля». Однако для получения требуемого уровня $B_{\text{п}}$ в приборах с длинными и тонкими каналами достаточно малый уровень дефокусирующих составляющих, менее 1,5-2%, должен быть обеспечен уже до установки выпрямителя, так как в противном случае пришлось бы использовать выпрямители, снижающие аксиальную фокусирующую составляющую магнитной индукции (то есть с большим заполнением магнитомягким материалом). При этом, в свою очередь,

из-за невозможности полностью заключить рабочий объем МФС в выпрямитель возможно появление дефокусирующих составляющих, обусловленных возникающей неоднородностью аксиальной составляющей магнитной индукции, в областях пролетного канала, где нет выпрямителя.

Сложности обеспечения требуемого уровня дефокусирующих составляющих во много раз увеличиваются при изготовлении МФС многолучевых приборов. Главной причиной этих трудностей является необходимость обеспечивать нужный уровень B_n при значительно больших линейных размерах рабочего объема МФС и сильное влияние неоднородности аксиальной составляющей магнитной индукции.

Как показывает опыт, для МФС с однородным магнитным полем максимально допустимый уровень дефокусирующих составляющих магнитной индукции достаточной для практических целей точно можно оценивать из предположений о совпадении центров сечения пучка с силовой линией магнитного поля, начало которой совпадает с центром сечения пучка на входе канала. Если ось z совпадает с центром канала, то, так как значения модуля $B_n(z)$ в сочетании с азимутом $\varphi(z)$ векторов этой величины и аксиальной составляющей $B_z(z)$ магнитной индукции фокусирующего поля характеризуют пространственное положение этой силовой линии, максимально допустимый уровень B_n оценивается по максимально допустимому отклонению $\Delta\rho(z)$ силовой линии от оси канала. При этом должно выполняться соотношение

$$\Delta\rho(z)_{\max} \leq r_k - r_n, \quad (1)$$

где r_k и r_n - радиусы пролетного канала и электронного пучка.

Вводя декартову систему координат, где ось $z = 0$ совпадает с началом пролетного канала, получим

$$\Delta\rho(z) = \sqrt{x(z)^2 + y(z)^2}, \quad (2)$$

где $x(z)$ и $y(z)$ – проекции отклонения силовой линии от оси канала, то есть

$$x(z) = \int_0^z \frac{B_n(z)}{B_z(z)} \cos \varphi(z) dz, \quad (3)$$

$$y(z) = \int_0^z \frac{B_n(z)}{B_z(z)} \sin \varphi(z) dz. \quad (4)$$

Исходя из практических соображений, с учетом дискретности проводимых измерений (измерение B_n по точкам, в равноотстоящих друг от друга координатах z_i) знак интеграла в формулах (3) и (4) должен быть заменен знаком суммы.

$$x(z_k) = \Delta z \sum_{i=0}^k \frac{B_n(z_i)}{B_z(z_i)} \cos \varphi(z_i); \quad (5)$$

$$y(z_k) = \Delta z \sum_{i=0}^k \frac{B_n(z_i)}{B_z(z_i)} \sin \varphi(z_i), \quad (6)$$

где $\Delta z = z_{i+1} - z_i = \text{const}$, а k – число интервалов Δz , укладываемых на участке от $z = 0$ до z_k .

Учитывая, что сумма

$$\frac{1}{k} \sum_{i=0}^k B_n(z_i) \quad (7)$$

равна среднему значению модуля дефокусирующей поперечной составляющей магнитной индукции на участке от $z = 0$ до z_k канала, в простейшем случае, для $\varphi(z) = \text{const}$, получим

$$\Delta \rho(z)_{\max} \approx L \frac{B_{ncp}}{B_{zcp}} \quad (8)$$

или, с учетом (1), для максимально допустимого среднего уровня B_n дефокусирующих составляющих магнитной индукции вдоль длины L канала

$$B_{ncp} \leq \frac{r - r_k}{L} n B_{zcp}, \quad (9)$$

где B_{zcp} – средний вдоль длины канала уровень аксиальной составляющей магнитной индукции.

Чем меньше радиус r_k и чем больше длина L канала, тем более жесткие требования должны предъявляться к уровню B_n . Для улучшения фокусирующих свойств МФС следует добиваться снижения среднего, а не максимального уровня дефокусирующих составляющих вдоль длины канала – МФС с большим максимальным, но меньшим средним уровнем B_n обладает более высокими фокусирующими свойствами по сравнению с МФС, имеющей меньшие максимальные, но большие средние уровни дефокусирующих составляющих.

При расположенных вдоль оси МФС пролетных каналах распределения $B_n(z)$ и $\varphi(z)$, как правило, носят случайный характер, с плавными изменениями B_n и φ вдоль длины каналов.

Вследствие общего характера соображений приведенные выше соотношения могут применяться для оценки максимально допустимого уровня дефокусирующих составляющих магнитной индукции как в приборах с расположенными на оси, так и для приборов с расположенными на удалении от оси пролетными каналами. Однако обеспечение требуемого уровня B_n при этом является значительно более сложной задачей. Так как изменения аксиальной составляющей магнитной индукции обусловлены неаксиальностью силовых линий магнитной индукции, причиной появления значительных дефокусирующих составляющих магнитной индукции может являться даже небольшая неоднородность B_z . Чем больше расстояние r_0 от оси МФС до оси каналов, тем более сильное влияние на уровень B_n оказывает неоднородность B_z .

Поперечные составляющие B_n , обусловленные неоднородностью B_z легко обнаруживаются по закономерным изменениям их азимута – в зависимости от распределения магнитной индукции значения $\varphi(z)$ вдоль пролетных каналов либо близки к некоторому постоянному значению, либо изменяются, один или несколько раз, на угол, примерно равный 180° . Отклонения от этой закономерности обусловлены влиянием указанных выше случайных факторов.

Для аксиально симметричных МФС при небольших r_0 ($r_0 \ll L$) максимально допустимую неоднородность $B_z(z)$ можно оценить с помощью известного выражения

$$B_\rho(\rho, z) = -\frac{\rho}{2} \frac{dB_{z0}}{dz} + \frac{r^3}{16} \frac{dB_{z0}^3}{dz^3} - \frac{r^5}{192} \frac{dB_{z0}^5}{dz^5} + \dots, \quad (10)$$

связывающего радиальную составляющую $B_\rho(z)$ на расстоянии ρ от аксиально симметричного магнитного поля с аксиальной составляющей на оси МФС [2].

Необходимо найти максимально допустимую неоднородность аксиальной составляющей магнитной индукции, при которой максимальные отклонения $\Delta\rho(z)$ магнитных силовых линий от осей каналов не превышают допустимых значений. При этом должно обеспечиваться выполнение аналогичного (1) соотношения

$$|\rho(z) - \rho(0)|_{\max} \leq r_k - r_n, \quad (11)$$

где $\rho(z) - \rho(0) = \Delta\rho(z)$, причем $\rho(0)$ должно быть принято равным расстоянию от оси МФС до осей каналов, то есть $\rho(0) = r_0$, а $\rho(z)$ – расстоянию от оси МФС до магнитной силовой линии, проходящей через точку $z=0$, $\rho=r_0$ на расстоянии от начала каналов. Вследствие принятой выше аксиальной симметрии магнитного поля и симметричного относительно оси МФС размещения каналов значения $\rho(z)$ для всех пролетных каналов одинаковы.

Для приборов с размещенными на разном расстоянии от оси каналами аналогичный анализ может быть проведен для каждой из групп каналов в отдельности. Очевидно, что наиболее жесткие ограничения на неоднородность B_z накладывают условия фокусировки в каналах, расположенных на наибольшем удалении от оси МФС.

Проведя преобразования, аналогичные (1) с учетом постоянства азимутов $\varphi(z)$ на участках нарастания и спада B_z для отклонения $\Delta\rho(z)$ этих силовых линий от осей каналов можно записать

$$\Delta\rho(z) = \int_0^z \frac{\rho(z)}{B_z(z)} dz, \quad (12)$$

где $B_z(z)$ – максимальное изменение модуля аксиальной составляющей модуля магнитной индукции в пролетных каналах.

Усредняя, вследствие высокой однородности, аксиальную составляющую магнитной индукции вдоль длины каналов, и с учетом интегрирования (10) по z , получим

$$\Delta\rho(z)_{\max} = \frac{r_0}{2} \left| \frac{\Delta B_{z0}}{B_{z_{cp}}} \right|, \quad (13)$$

а с учетом (11)

$$\left| \frac{\Delta B_{z0}}{B_{z_{cp}}} \right| < 2 \frac{r_k - r_n}{r_0}, \quad (14)$$

где $\left| \frac{\Delta B_{z0}}{B_{z_{cp}}} \right|$ – максимальное изменение модуля аксиальной составляющей магнитной индукции на оси МФС по сравнению с его значением при $z=0$. Так как, вследствие высоких требований к однородности магнитного поля, $B_z(z)_{cp}$ близки к среднему значению $B_z(z)$ на оси МФС, последнее выражение позволяет оценить требуемую однородность магнитной индукции вдоль оси системы.

Но изменения $B_z(z)$ вдоль оси МФС – не единственная существенная, характерная для многолучевых ЭВП, причина увеличения дефокусирующих составляющих магнитной индукции в удаленных от оси каналах. Обычно отверстия пролетных каналов размещают вдоль окружностей радиусов r_0 , $2r_0$, $3r_0$ и т. д. таким образом, чтобы число отверстий на каждой из окружностей было пропорционально радиусу окружности, на которой они размещены. На рис. 1а показано одно из часто применяемых размещений отверстий пролетных каналов на торцах магнитопроводов 1 и 2 с отверстиями, размещенными на окружностях радиусом r_0 и $2r_0$. Точные расчеты влияния размеров и взаимного размещения отверстий пролетных каналов на распределения B_z и B_n и соответствующих им изменений силовых линий магнитного поля в пролетных

каналах многолучевых ЭВП возможны лишь применением численных, машинных методов расчета. Однако качественное рассмотрение и оценка возникающих при этом искажений силовых линий магнитного поля в пролетных каналах могут быть проведены уже исходя из физической сущности зарядового представления магнитных систем.

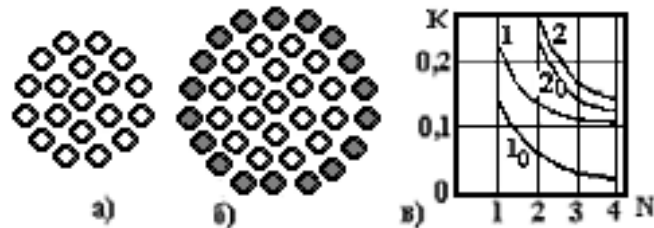


Рис. 1. К оценке составляющих B_r магнитного поля в приторцевых частях длины пролетных каналов: а) размещение отверстий пролетных каналов на торцах магнитопроводов; б) конструкция МФС с компенсирующими немагнитными вставками; в) значения B_r в приторцевых частях длины пролетных каналов.

Так, уже из показанного на рис. 1а размещения пролетных каналов очевидно, что распределения поверхностных плотностей магнитных зарядов на обращенных друг к другу торцах магнитопроводов не аксиально симметричны осям удаленных от оси МФС пролетных каналов. Это приводит к образованию в этих каналах, соответствующих радиальных составляющих B_r магнитной индукции фокусирующего поля, а, следовательно, и к ухудшению аксиальной симметрии магнитного поля осям этих каналов с соответствующим ухудшением возможностей получения в них качественной фокусировки электронных пучков.

Из этого рассмотрения очевидно также, что обусловленная действием этого фактора асимметрия поверхностных плотностей магнитных зарядов относительно осей, удаленных от оси МФС пролетных каналов наиболее значительна прежде всего в начальной и конечной частях их длины.

Использование суперпозиционного представления поверхностных плотностей σ магнитных зарядов на торцах магнитопроводов позволяет оценить численные значения радиальных составляющих B_r магнитной

индукции фокусирующего поля в начальной и конечной частях длины L удаленных от оси МФС пролетных каналов. На рис. 1в в виде графиков приведены результаты таких оценочных расчетов. Буквой N на нем обозначено число окружностей, вдоль которых на торцах магнитопроводов размещены отверстия диаметром d пролетных каналов. Рассмотрены варианты с четырьмя такими окружностями, радиусы которых составляют r_0 , $2r_0$, $3r_0$ и $4r_0$ соответственно. В соответствии с обычно применяемым размещением пролетных каналов число отверстий на этих окружностях составляло 6, 12, 18 и 24 соответственно. Кроме того, еще по одному такому отверстию диаметром d размещено на оси торцевой поверхности каждого магнитопровода.

Значения K вдоль ординаты графиков рис. 1в являются коэффициентами пропорциональности, связывающими радиальные составляющие B_ρ магнитной индукции в начальной и конечной частях длины пролетных каналов с магнитной индукцией B_0 фокусирующего поля в средней части их длины (в области однородного магнитного поля), а также с размерами и размещением пролетных каналов. Аналитически связь максимальных значений модулей B_ρ с модулями значений B_0 магнитной индукции может быть выражена как

$$|B_\rho| = K \times \frac{\pi d^2}{4r_0^2} \times |B_0|, \quad (15)$$

где K зависит только от порядкового номера окружности, на которой определяется B_ρ и количества окружностей с отверстиями пролетных каналов. Конечно, при отличающемся от рассмотренного количестве отверстий на окружностях изменяются и значения коэффициента K .

Для каналов на окружностях радиусом r_0 (кривые 1 на рис. 3в) и $2r_0$ (кривые 2 на рис. 3в) показаны зависимости этого коэффициента K от количества окружностей с отверстиями пролетных каналов. Кроме того, кривыми 1_0 и 2_0 показаны значения K также для конструкций, в которых отсутствуют отверстия диаметром d непосредственно на оси ЭВП. Приведенные зависимости подтверждают заметное увеличение B_ρ с удалением осей пролетных каналов от оси МФС. Более того, даже для ближайших к оси

МФС каналов, размещенных на расстоянии r_0 от оси, к существенному увеличению B_p ведет и размещение отверстий пролетных каналов на оси МФС (кривые 1 и 2). Приведенные зависимости подтверждают сделанное выше предположение, что наиболее сильно влияние этого фактора для периферийных каналов, наиболее удаленных от оси МФС. В то же время увеличение количества окружностей с отверстиями пролетных каналов существенно уменьшает B_p в близких к оси МФС пролетных каналах.

Поскольку, как уже говорилось выше, в удаленных от оси МФС пролетных каналах радиальные составляющие B_p магнитной индукции являются ничем иным, как дефокусирующими, поперечными составляющими магнитного поля, то целью разработчиков многолучевых ЭВП, а также разработчиков и изготовителей МФС для их пакетирования, является получение уровней B_p в пределах допустимых значений.

Отсюда можно сделать ряд важных для разработчиков и изготовителей многолучевых ЭВП и МФС выводов.

Прежде всего, представленные результаты доказывают необходимость контроля B_p прежде всего в удаленных от оси МФС пролетных каналах.

Нецелесообразно размещение отверстий пролетных каналов непосредственно на оси МФС. Они существенно увеличивают B_p даже в близких к оси прибора каналах.

Для уменьшения B_p в каналах с электронными пучками, удаленными от оси ЭВП, целесообразно проделывать такие же отверстия на окружностях, размещенных вне окружностей с отверстиями для электронных пучков. При необходимости, во избежание искажений распределений высокочастотного электрического поля, подобные отверстия могут закрываться впаянными в них пробками из немагнитного токопроводящего металла. Как следует из показанных на рис. 1в зависимостей, это позволит значительно уменьшить B_p (а, следовательно, и B_n) и в расположенных близко к оси ЭВП пролетных каналах.

Литература

1. Царев В.А., Спиридонов Р.В. Магнитные фокусирующие системы электровакуумных микроволновых приборов О-типа: учебное пособие. Саратов: изд-во «Новый ветер», 2010. 352 с.
2. Жигарев А.А., Шамаева Г.Г. Электронно-лучевые и фотоэлектронные приборы. М.: Высшая школа, 1982. 463 с.

Для цитирования:

И. Н. Афонин, А. Ю. Кивокурцев, А. М. Самылкин. Методы снижения уровня дефокусирующих составляющих в магнитных фокусирующих системах с однородным магнитным полем. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 3. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar19/8/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.3.8