

ПРОГРАММНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ CyclSyntWin ДЛЯ СИНТЕЗА И ОПТИМИЗАЦИИ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР И МАГНИТОВ ЦИКЛОТРОНОВ

Й. Франко, Г. Г. Гульбекян, И. А. Иваненко

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Лаборатория ядерных реакций ОИЯИ (Дубна) занимается разработкой и созданием новых циклотронов. В начальной фазе таких разработок необходимо за относительно короткое время проанализировать несколько вариантов их магнитных структур.

В работе рассматривается разработанное в лаборатории программное приложение CyclSyntWin, которое позволяет предварительно проанализировать несколько вариантов и определить основные физические и геометрические параметры магнитной структуры, а также самого магнита циклотрона. Таким способом полученные данные могут быть в дальнейшем использованы в 3D-программных приложениях, что существенно ускоряет процесс финального синтеза магнитной структуры и магнита циклотрона.

Программным приложением CyclSyntWin можно синтезировать и оптимизировать магнитные структуры циклотронов с прямыми и спиральными секторами, близкие азимутально-симметричным. Отношение их воздушных зазоров в долине и в районе секторов не должно превышать значения 25, угол спиральных секторов не должен быть больше 40° и среднее магнитное поле не более 2 Тл.

The Laboratory of Nuclear Reactions, JINR, Dubna, is engaged in the development and creation of new cyclotrons. In the initial phase of development it is necessary in a relatively short period of time to analyze several variants for their magnetic structures.

The paper deals with the software application CyclSyntWin developed at the Laboratory, which allows one to pre-analyze several variants and determine the basic physical and geometrical parameters of the magnetic structure and the cyclotron magnet. In this way, the data can then be used in the 3D software applications, which greatly speeds up the process of the final synthesis of the magnetic structure and a cyclotron magnet.

Software application CyclSyntWin can synthesize and optimize the magnetic structures of cyclotrons with straight and spiral sectors, close to azimuthally symmetric ones. The ratio of the air gaps in the valley and in the sectors area should not exceed 25, the angle of the spiral sector shall not be greater than 40 degrees, and the average magnetic field is no more than 2 T.

PACS: 07.05.Fb; 29.20.dg

ВВЕДЕНИЕ

Для синтеза и оптимизации магнитных структур и магнитов циклотронов применяются как более простые и доступные программные приложения (Poisson [1]), так и 3D-приложения, разработанные коммерческими фирмами (ANSYS [2], Opera3D-Tosca [3], MerMaid [4], Kompot [5, 6] и т. д.).

Лаборатория ядерных реакций ОИЯИ (Дубна) является физическим центром, в котором было разработано и создано несколько циклотронов.

Лаборатория также занимается разработкой новых циклотронов, цели и задачи которых бывают разные. В начальной фазе таких разработок необходимо за относительно короткое время проанализировать несколько вариантов магнитных структур. Требования к точности такого предварительного анализа невысокие, так как для окончательного синтеза выбранной структуры чаще всего используется одно из вышеупомянутых 3D-программных приложений.

Практика показала, что применение в данном приложении зависимостей с нижепоказанными пределами неточностей удовлетворяет этим требованиям.

На пределы неточностей этих зависимостей в основном влияет разнообразие конструктивного решения магнитных структур, входящих в базу данных, и ограничивает их области применения.

Разброс магнитных свойств используемой стали для их конструирования меньше влияет на точность результатов применения этих аналитических зависимостей.

В этой работе рассматривается разработанное в лаборатории программное приложение CyclSyntWin, которое позволяет предварительно проанализировать несколько вариантов и определить основные физические и геометрические параметры магнитной структуры, а также самого магнита циклотрона.

Таким способом полученные данные могут быть в дальнейшем использованы в 3D-программных приложениях, что существенно ускоряет процесс финального синтеза магнитной структуры и магнита циклотрона.

Программным приложением CyclSyntWin можно синтезировать и оптимизировать магнитные структуры циклотронов с прямыми и спиральными секторами, близкие азимутально-симметричным. Отношение их воздушных зазоров в долине и в районе секторов не должно превышать величину 25, угол спиральных секторов не должен быть больше 40° и среднее магнитное поле не больше 2 Тл.

Программное приложение CyclSyntWin работает под операционной системой Windows.

1. ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ И ОСНОВНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОГРАММНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ

В основу алгоритма первой версии программного приложения CyclSynt, работающего под операционной системой DOS, вошли ранее опубликованные результаты анализа некоторых зависимостей магнитных структур, экспериментально полученные как на модельных, так и на реально действующих магнитах циклотронов [6].

В последние годы в лаборатории были разработаны и созданы циклотроны DC 72 для Словакии [7–11] и DC 60 для Казахстана [12]. Также разработано физико-техническое обоснование проекта нового циклотрона DC 350 для Казахстана [13]. В процессе этих работ были получены новые данные как в результате экспериментально измеренных карт полей магнитных структур (первых двух циклотронов), так и 3D-расчетов этих структур [14, 15]. Полученные данные были использованы для проверки и уточнения используемых в первой версии программного приложения CyclSynt аналитических зависимостей параметров магнитных структур.

Практическая работа с этим приложением вызвала необходимость расширения возможности его применения за пределами используемых в нем аналитических зависимостей.

Для расширения этих границ была создана и трехмерной программой проанализирована модель магнитной структуры с более глубокой вариацией магнитного поля (с отношением воздушных зазоров в долине и в районе секторов до 25). Таким способом были получены в более широком диапазоне новые аналитические зависимости некоторых параметров магнитных структур, которые вошли в основу последней версии программного приложения CyclSyntWin.

Программное приложение позволяет выбрать (в виде опции) один из двух исходных параметров — энергию ионов на нуклон или диаметр полюса магнита, определяющих логику развития расчета (рис. 1).

В программном приложении используется несколько экспериментально полученных параметров, которые редко меняются (рис. 1), а также параметры, определение которых рассмотрено ниже.

На рис. 2 наглядно показано определение первого из этих параметров — отношение апертуры магнитной структуры $BeAper$ к вертикальному размеру пучка $BeDim$.

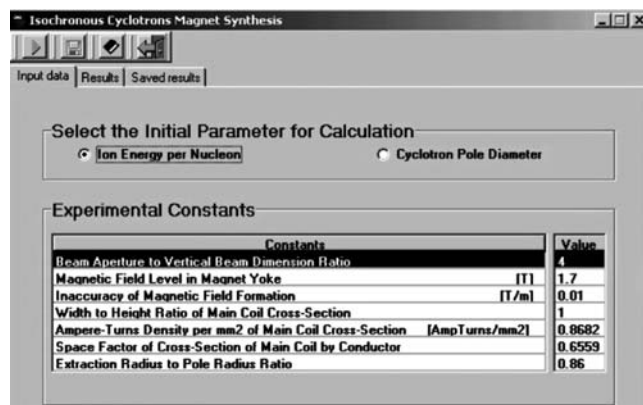


Рис. 1. Отображение окна выбора исходного параметра программного приложения и определения экспериментально полученных параметров

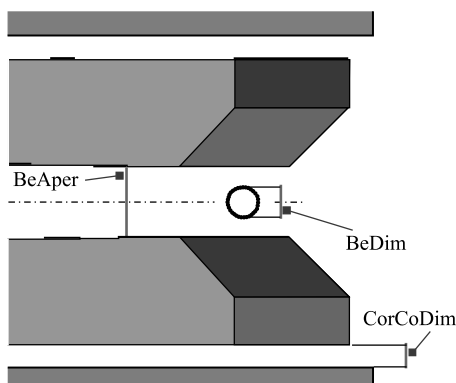


Рис. 2. Наглядное отображение параметров пучка и магнитной структуры циклотрона

Parameter	Value
Necessary Ion Energy per Nucleon [MeV/u]	2.775
Average Magnetic Field on Extraction Radius [T]	1.5341
Ion Atomic Mass	129
Ion Charge	18
Symmetry Number of Sectors Structure (3, 4)	4
Spiral Angle of Sectors on Extraction Radius [degree]	0
Vertical Betatron Oscillations	0.357
Aperture for Ions Beam [mm]	60
Vertical Dimension of Correcting Coils under the Sector [mm]	20
Conductor Material of Main Coil (Cu, Al)	Cu

Рис. 3. Отображение окна определения входных параметров программного приложения

Плотность ампер-витков $kATu_{dens}$ определяется как отношение величины ампер-витков одной из двух катушек основной обмотки к площади геометрического сечения этой катушки.

На следующем шаге задается еще несколько входных параметров (рис. 3). Определение двух из них, апертуры для пучка $BeAper$ и воздушного зазора для корректирующих катушек $CorCoDim$, также наглядно отображено на рис. 2.

После ввода всех входных параметров и запуска расчета программное приложение выдает на экране основную часть результатов расчета как физических, так и геометрических параметров магнитной структуры и параметров Ш-образного магнита циклотрона (рис. 4).

Полный набор всех результатов расчета (в том числе и геометрических параметров магнита броневого типа) можно, по усмотрению пользователя, записать в созданный для этого текстовый документ.

Большинство из этих параметров вычисляется по общеизвестным формулам, но для некоторых из них используются нами экспериментально полученные аналитические зависимости.

Для определения зависимости отношения воздушных зазоров в долине и в районе секторов $d_{vall,hill}$ магнитной структуры от среднего магнитного поля B и флаттера F используется формула вида

$$d_{vall,hill} = \frac{h_0 + h_1 \times \ln(B) + h_2 \times (\ln(B))^2 + h_3 \times (\ln(B))^3 + h_4 \times \ln(F) + h_5 \times (\ln(F))^2}{(1 + h_6 \times \ln(B) + h_7(\ln(B))^2 + h_8 \times (\ln(B))^3 + h_9 \times \ln(F))}$$

В процессе сравнения данных отношения воздушных зазоров в долине и в районе секторов $d_{vall,hill}$, полученных по этой зависимости, с экспериментальными данными была определена неточность их вычисления в пределах $+23 \div -9\%$.

На рис. 5 отображено графическое представление этой зависимости.

Зависимость величины ампер-витков на единицу воздушного зазора в районе секторов $AmTur_{hill}$ от среднего магнитного поля B и отношения воздушных зазоров в долине

The screenshot shows the 'Isochronous Cyclotrons Magnet Synthesis' software window. It has three tabs: 'Input data', 'Results', and 'Saved results'. The 'Results' tab is active, displaying two tables of data.

Physical Data

Parameter	Value
Total Ions Energy at the Extraction Radius [MeV]	357.97
Coefficient of Magnetic Field Growth	0.0060
Vertical Betatron Oscillation	0.3570
Vertical Dimension of Ions Beam [mm]	15.0
Total Hill Air Gap on Extraction Radius [mm]	100.0

Parameter	Value	Value	Value
Average Magnetic Field [T]	1.514	1.534	1.554
Cyclotron Extraction Radius [m]	1.136	1.121	1.107
Cyclotron Pole Diameter [m]	2.642	2.608	2.574
Corrected Coefficient of Magnetic Field Growth	0.0135	0.0133	0.0131
Vertical Acceptance of Magnetic Structure [Pi.mm.mrad]	282.8	286.6	290.3
Radial Betatron Oscillations	1.0241	1.0239	1.0238
Flutter	0.1321	0.1319	0.1318
Cyclotron Center Magnetic Field [T]	1.5096	1.5295	1.5495
Radial Growth of Isochronous Magnetic Field [T]	0.0045	0.0046	0.0046
Ion Frequency [MHz]	3.235	3.277	3.320
Valley Air Gap [mm]	271.2	279.6	289.2
Center Probe Air Gap [mm]	118.0	119.0	120.2
Valley Air Gap to Hill Air Gap on Extraction Radius	2.71	2.80	2.89
Main Coils Ampere-Turns [kAturns]	252.31	263.94	276.44
Main Coils Input Power [kW]	62.17	64.48	66.99

Geometrical Data

Parameter	Value	Value	Value
H-shape Magnet Length [m]	5.49	5.48	5.47
H-shape Magnet Height [m]	3.12	3.15	3.19
H-shape Magnet Width [m]	2.74	2.71	2.67
H-shape Magnet Iron Weight [t]	309	307	304
H-shape Magnet Yoke Cross Section [m2]	2.441	2.410	2.379
Main Coil Cross-Section Width [mm]	381.2	389.9	399.0
Main Coil Cross-Section Height [mm]	381.2	389.9	399.0
Main Coils Conductor Weight [t]	16.1	16.7	17.4

Рис. 4. Отображение окна результатов синтеза магнитной структуры и магнита циклотрона

и в районе секторов $d_{\text{vall,hill}}$ магнитной структуры определяется по формуле вида

$$\text{AmTur}_{\text{hill}} = b_0 + b_1 / (1 + ((B - b_2) / b_3)^2) + b_4 / (1 + ((d_{\text{vall,hill}} - b_5) / b_6)^2) + b_7 / ((1 + ((B - b_2) / b_3)^2) \times (1 + ((d_{\text{vall,hill}} - b_5) / b_6)^2)).$$

В процессе сравнения данных ампер-витков на единицу воздушного зазора в районе секторов $\text{AmTur}_{\text{hill}}$, полученных по этой зависимости, с экспериментальными данными была определена неточность их вычисления в пределах $+8 \div -5\%$.

На рис. 6 отображено графическое представление этой зависимости.

Мощность потерь в основной обмотке магнита Pow зависит от удельного сопротивления проводника ρ_{cond} , диаметра полюса D_{pole} , количества ампер-витков в основной обмотке AmTur , коэффициента отношения ширины сечения основной обмотки к высоте k_{coil} , плотности ампер-витков $\text{kATu}_{\text{dens}}$ основной обмотки на 1 мм^2 ее сечения, коэффициента заполнения проводником сечения обмотки $\text{Cond}_{\text{dens}}$ и определяется по формуле вида

$$\text{Pow} = \rho_{\text{cond}} \pi \left(D_{\text{pole}} + \sqrt{\left(5 \cdot 10^{-7} \text{ AmTur} \frac{k_{\text{coil}}}{\text{kATu}_{\text{dens}}} \right)} \right) \text{ AmTur} \frac{\text{kATu}_{\text{dens}}}{\text{Cond}_{\text{dens}}}.$$

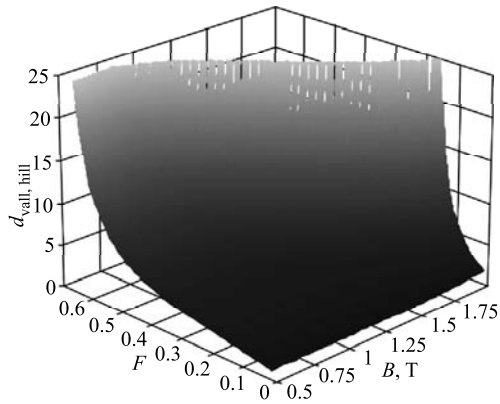


Рис. 5. Графическое представление зависимости для определения отношения воздушных зазоров $d_{vall,hill}$

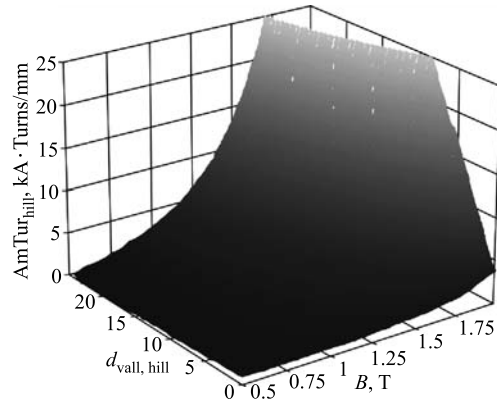


Рис. 6. Графическое представление зависимости для определения ампер-витков на единицу воздушного зазора $AmTur_{hill}$ в районе секторов

Величина перепада уровней магнитного поля в районе секторов и в долинах магнитной структуры $FieDif_{hill,vall}$ от среднего магнитного поля B и отношения воздушных зазоров в долине и в районе секторов $d_{vall,hill}$ определяется по формуле вида

$$FieDif_{hill,vall} = \frac{k_0 + k_2 B + k_4 \ln(d_{vall,hill}) + k_6 B^2 + k_8 (\ln(d_{vall,hill}))^2 + k_{10} B \ln(d_{vall,hill})}{1 + k_1 B + k_3 \ln(d_{vall,hill}) + k_5 B^2 + k_7 (\ln(d_{vall,hill}))^2 + k_9 B \ln(d_{vall,hill})}$$

В процессе сравнения данных перепада уровней магнитного поля $FieDif_{hill,vall}$ в районе секторов и в долинах магнитной структуры, полученных по этой зависимости, с экспериментальными данными была определена неточность их вычисления в пределах $+8 \div -6\%$.

На рис. 7 отображено графическое представление этой зависимости.

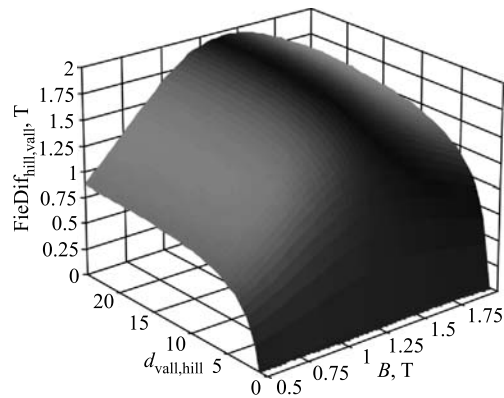


Рис. 7. Графическое представление зависимости для определения перепада уровней магнитного поля в районе секторов и в долинах магнитной структуры $FieDif_{hill,vall}$

Для оценки влияния выбора геометрии магнитной структуры на вакуумные потери пучка вычисляется коэффициент $VacLosCoef$, величина которого зависит от вакуумной поверхности $VacSurface$ и от максимального радиуса вывода R_{extr} :

$$VacLosCoef = VacSurface \times R_{extr}.$$

Площади сечений $EquivalentYokePlane$ стойки и балки Ш-образного магнита зависят от площади полюса $MagnetPolePlane$, среднего магнитного поля B и выбранного уровня магнитного поля $YoFldLev$ в стойках и балках магнита и для такого типа магнита определяются по формуле вида

$$EquivalentYokePlane = \frac{MagnetPolePlane}{2} \frac{B}{YoFldLev}.$$

Эта величина в итоге определяет геометрические размеры и вес магнита. Наглядное отображение этих сечений для Ш-образного магнита показано на рис. 8.

Площадь сечения $EquivalentYokePlane$ кольцевой стойки и кольцевой балки магнита «броневое» типа зависит от площади полюса $MagnetPolePlane$, среднего магнитного поля B , выбранного уровня магнитного поля $YoFldLev$ в кольцевой стойке и кольцевых балках магнита и для такого типа магнита определяется по формуле

$$EquivalentYokePlane = MagnetPolePlane \frac{B}{YoFldLev}.$$

Наглядное отображение этих сечений для «броневое» магнита показано на рис. 9.

Положение основной катушки относительно края полюса и медианной плоскости определено высотой ее сечения (вертикальным размером). Наглядно это приведено на рис. 10. Таким образом, определено также положение балок Ш-образного магнита и кольцевых балок магнита «броневое» типа относительно медианной плоскости.

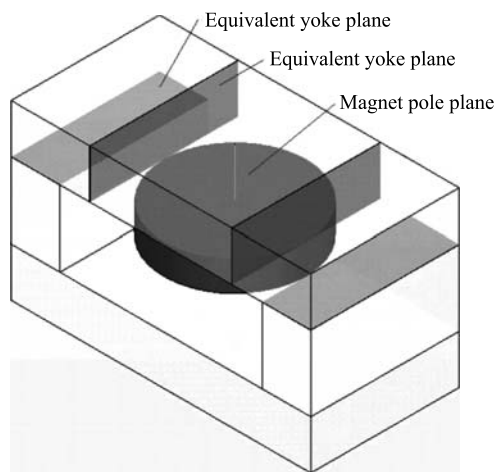


Рис. 8. Наглядное отображение сечений балок, стоек и площади полюса Ш-образного магнита циклотрона

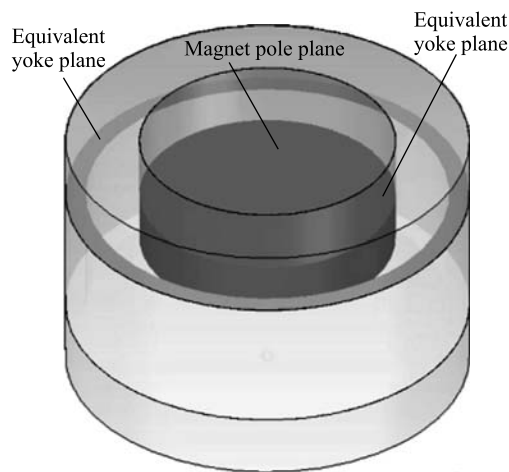


Рис. 9. Наглядное отображение сечений верхней кольцевой балки, кольцевой стойки и площади полюса магнита циклотрона «броневое» типа

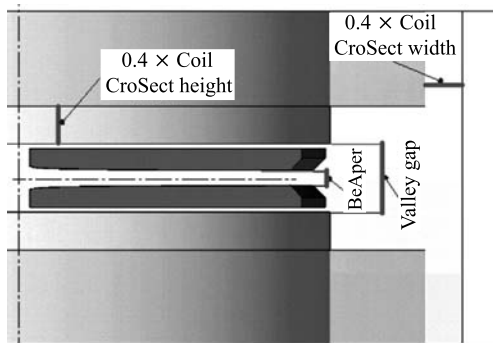


Рис. 10. Наглядное отображение определения положения балок и стоек Ш-образного магнита циклотрона

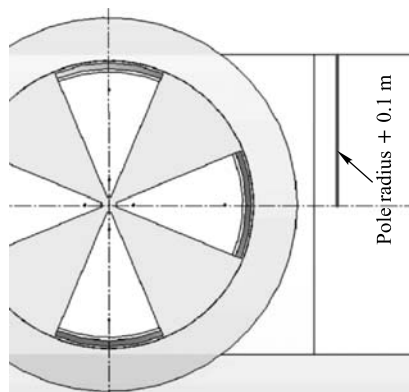


Рис. 11. Наглядное отображение определения ширины балок и стоек Ш-образного магнита циклотрона

Горизонтальный размер сечения основной катушки определяет положение стоек Ш-образного магнита относительно его вертикальной оси (расстояние между стойками), как показано на рис. 10, а также внутренний радиус кольцевой стойки магнита «бронированного» типа.

Определение размера ширины стойки, а также балки Ш-образного магнита приведено на рис. 11.

Geometrical Data			
Parameter	Value	Value	Value
H-shape Magnet Length [m]	5.49	5.48	5.47
H-shape Magnet Height [m]	3.12	3.15	3.19
H-shape Magnet Width [m]	2.74	2.71	2.67
H-shape Magnet Iron Weight [t]	309	307	304
H-shape Magnet Yoke Cross Section [m ²]	2.441	2.410	2.379
Main Coil Cross-Section Width [mm]	381.2	389.9	399.0
Main Coil Cross-Section Height [mm]	381.2	389.9	399.0
Main Coils Conductor Weight [t]	16.1	16.7	17.4

Рис. 12. Наглядное отображение окна геометрических и весовых параметров Ш-образного магнита циклотрона и основной катушки

После определения всех геометрических размеров можно с помощью известных формул рассчитать остальные параметры магнита, такие как вес и другие. Некоторые из них выводятся на экран компьютера (см. рис. 12).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренное в работе программное приложение CyclSyntWin позволяет предварительно проанализировать несколько вариантов и определить основные физические и геометрические параметры магнитной структуры и самого магнита циклотрона.

Таким способом полученные данные могут быть в дальнейшем использованы в 3D-программных приложениях, что существенно ускоряет процесс финального синтеза магнитной структуры и магнита циклотрона.

В работе представлены аналитические зависимости параметров магнитных структур, которые были получены в результате обработки баз данных реально работающих или проектируемых циклотронов.

Программным приложением *CyclSyntWin* можно синтезировать и оптимизировать магнитные структуры циклотронов с прямыми и спиральными секторами, близкие азимутально-симметричным. Отношение их воздушных зазоров в долине и в районе секторов не должно превышать величину 25, угол спиральных секторов не должен быть больше 40° и среднее магнитное поле не больше 2 Тл.

В Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ уже несколько лет используется это программное приложение в качестве предварительного синтеза и оптимизации основных параметров магнитных структур и магнитов циклотронов.

Использование этого приложения подтверждается сравнением его результатов с результатами 3D-расчетов и с данными, экспериментально полученными на создаваемых установках.

Программное приложение *CyclSyntWin* распространяется бесплатно. Чтобы получить доступ к нему, необходимо связаться с авторами статьи, контактные данные которых приведены на http://flerovlab.jinr.ru/flnr/staff_list.php.

Более детальное описание алгоритма программы, переменных, коэффициентов аналитических зависимостей и уравнений показано в приложении.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Программное приложение *CyclSyntWin* распространяется бесплатно. Приложение разработано в программной среде Delphi. Для визуализации его результатов, а также для самого текста программы использовался английский язык. Таким образом были расширены возможности более широкого доступа к данному приложению.

Ниже представлены входные данные приложения *CyclSyntWin* с указанием их обозначения в исходном тексте программы. Далее следуют константы, коэффициенты аналитических функций и сами функции, которые применены в программе для вычисления указанных данных.

Experimental Constants

Beam Aperture to Vertical Beam Dimension Ratio	$= b_{coef}$
Magnetic Field Level in Magnet Yoke [T]	$= YoFldLev$
Inaccuracy of Magnetic Field Formation [T/m]	$= dB_{inacc}$
Width to Height Ratio of Main Coils Cross-Section	$= WiHeRat$
Ampere-Turns Density per mm ² of Main Coils Cross-Section [AmpTurns/mm ²]	$= kATu_{dens}$
Space Factor of Cross-Section of Main Coil by Conductor	$= Cond_{dens}$
Ratio Coefficient of Extraction Radius to Pole Radius	$= r_{coef}$

Input Parameters

Necessary Ion Energy per Nucleon [MeV/u]	$= T_{ion,nucl}$
Supposed Average Field on Extraction Radius [T]	$= B$
Ion Atomic Mass	$= A$
Ion Charge	$= q_i$

Symmetry Number of Sectors Structure (3, 4)	= N
Spiral Angle of Sectors on Extraction Radius [degree]	= ξ_{deg}
Vertical Betatron Oscillation	= ν_z
Aperture for Ions Beam [mm]	= Be_{Aper}
Vertical Dimension of Correcting Coils under Sector [mm]	= $CorCo Dim$
Conductor Material of Main Coils (Cu, Al)	= Cu

Constants

mu	=	1.660538782E-27 Atomic Mass Unit *
c	=	299792458 Light Velocity *
e	=	1.602176487E-19 Electron-Volt *
ResistCu	=	0.0196 Cu Specific Resistance
ResistAl	=	0.03197 Al Specific Resistance
WidthCoef	=	0.1 Magnet Yoke Width Extension Value
WeFeUnit	=	7800 Fe Specific Mass
WeCuUnit	=	8900 Cu Specific Mass
WeAlUnit	=	2170 Al Specific Mass

* <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>

Analytical Function Coefficients

$h_0 = -3.3870461$	Function Coefficients:
$h_1 = 3.8867933$	$dvalley/dhill = f(B, CorrFlutt) [; T,]$
$h_2 = 0.41973313$	
$h_3 = -7.3487012$	
$h_4 = 3.1914273$	
$h_5 = 0.39757636$	
$h_6 = 1.4210509$	
$h_7 = 2.9395$	
$h_8 = 1.7711816$	
$h_9 = 2.3284448$	
$b_0 = 10.861889$	Function Coefficients:
$b_1 = -289.23006$	$kAmpTurns/Sector Air-gap = f(B, dvalley/dhill) [kAmpTurns/mm; T,]$
$b_2 = 2.2198545$	
$b_3 = 0.28540518$	
$b_4 = -22.510264$	
$b_5 = 80.353384$	
$b_6 = 72.891167$	
$b_7 = 651.48818$	
$k_0 = 0.001844899$	Function Coefficients:
$k_1 = -1.0778569$	$FieDiffSectVall = f(B, dvalley/dhill) [T; T,]$
$k_2 = -0.00085883606$	
$k_3 = -0.011408802$	
$k_4 = 0.23317092$	
$k_5 = 0.41351787$	
$k_6 = 0.00048921454$	
$k_7 = 0.003162237$	

$$\begin{aligned} k_8 &= -0.04179965 \\ k_9 &= 0.043875015 \\ k_{10} &= 0.14439138 \end{aligned}$$

Formulas

Angle Unit Transmission

$$\xi_{rad} = \xi_{deg} \times \pi/180$$

Half Vertical Beam Dimension

$$z = Be_{Aper}/(2 \times be_{coef}) [mm; mm]$$

$$be_{coef} = Be_{Aper}/Be_{Dim}$$

Quiet Ion Energy

$$T_0 = A \times m_u \times c^2 / (e \times 10^6) [MeV;]$$

Gap Between the sectors

$$d_{hill} = 2 \times be_{coef} \times z + 2 \times CorCo Dim [mm;]$$

Procedure “CalcEnergy”, ($T_{ion,nucl}$ Input Parameter)

Total Ion Energy

$$T_{ion} = T_{ion,nucl} \times A [MeV;]$$

Coefficient of Radial Magnetic Field Increase

$$k = (T_{ion}/T_0)^2 + 2 \times (T_{ion}/T_0)$$

Extraction Radius

$$R_{extr} = ((A \times m_u \times c) / (q_i \times e \times B)) \times \sqrt{(((T_{ion} \times 10^6 \times e) / (A \times m_u \times c^2)) + 1)^2 - 1} [m;]$$

Centre Magnetic Field

$$B_{cent} = B / \sqrt{1 + (e \times q_i \times B \times R_{extr} / (A \times m_u \times c))^2} [T;]$$

Ions Frequency

$$f_{ion} = B_{cent} \times e \times q_i / (2 \times \pi \times 10^6 \times A \times m_u) [MHz;]$$

Pole Diameter

$$D_{pole} = 2 \times R_{extr} / r_{coef} [m;]$$

Vertical Magnetic Structure Acceptance on Extraction Radius

$$A_z = \nu_z \times z^2 \times 10^3 / R_{extr} [pi.mm.mrad; mm, m]$$

Field Forming Inaccuracy

$$k_{inacc} = R_{extr} / B \times dB_{inacc}$$

Corrected Coefficient of Radial Magnetic Field Increase

$$k_{corr} = k + k_{inacc}$$

Flutter

$$F = (N^2 - 1) / N^2 \times (\nu_z^2 + k_{corr}) / (1 + 2 \times tg^2 \xi)$$

Radial Betatron Oscillation

$$\nu_r = \sqrt{(1 + k_{corr} + 3 \times N^2 / ((N^2 - 1) \times (N - 4)) \times F \times (1 + tg^2 \xi))}$$

Valley to Hill Air Gap

$$\begin{aligned} d_{vall,hill} = & \\ & \left(h_0 + h_1 \times \ln(B) + h_2 \times (\ln(B))^2 + h_3 \times (\ln(B))^3 + h_4 \times \ln(F) + h_5 \times (\ln(F))^2 \right) / \\ & \left(1 + h_6 \times \ln(B) + h_7 (\ln(B))^2 + h_8 \times (\ln(B))^3 + h_9 \times \ln(F) \right) \end{aligned}$$

Valley Air Gap

$$d_{valley} = d_{vall,hill} \times d_{hill}$$

Ampere-Turns per Hill Air Gap

$$AmTur_{hill} = b_0 + b_1 / \left(1 + ((B - b_2) / b_3)^2\right) + b_4 / \left(1 + ((d_{vall,hill} - b_5) / b_6)^2\right) + b_7 / \left(\left(1 + ((B - b_2) / b_3)^2\right) \times \left(1 + ((d_{vall,hill} - b_5) / b_6)^2\right)\right)$$

Ampere-Turns

$$AmTur = 10^3 \times AmTur_{hill} \times d_{hill}$$

Main Coils Power

$$Pow = \rho_{cond} \times \pi \times \left(D_{pole} + \sqrt{(5 \times 10^{-7} \times AmTur \times k_{coil} / kATu_{dens})}\right) \times AmTur \times kATu_{dens} / Cond_{dens}$$

Radial Field Difference

$$diB_{rad} = B - B_{cent}$$

Hill-Valley Magnetic Field Difference

$$FieDif_{sect,vall} = (k_0 + k_2 \times B + k_4 \times \ln(d_{vall,hill}) + k_6 \times B^2 + k_8 \times (\ln(d_{vall,hill}))^2 + k_{10} \times B \times \ln(d_{vall,hill})) / (1 + k_1 \times B + k_3 \times \ln(d_{vall,hill})) + k_5 \times B^2 + k_7 \times (\ln(d_{vall,hill}))^2 + k_9 \times B \times \ln(d_{vall,hill}))$$

Hill Magnetic Field

$$B_{sect} = B + FieDif_{sect,vall} / 2$$

Valley Magnetic Field

$$B_{vall} = B - FieDif_{sect,vall} / 2$$

Ampere-Turn for $d_{valley,hill} = 1$

$$AmTur_{d_{vall,hill}=1} = b_0 + b_1 / \left(1 + ((B - b_2) / b_3)^2\right) + b_4 / \left(1 + ((1 - b_5) / b_6)^2\right) + b_7 / \left(\left(1 + ((B - b_2) / b_3)^2\right) \times \left(1 + ((1 - b_5) / b_6)^2\right)\right)$$

Vacuum Losses Coefficient

$$VacLosCoeF = VacSurface \times R_{extr}$$

Procedure "CalcDiameter", ($R_{extr,r}$ Input Parameter)

Total Ions Energy

$$T_{ion} = m_u \times c^2 / (10^6 \times e) \times \left(\sqrt{(B \times R_{extr,r} \times q_i \times e / (A \times m_u \times c)^2 + 1)} - 1\right) [MeV;]$$

Centre Magnetic Field

$$B_{cent} = B / \sqrt{1 + (e \times q_i \times B \times R_{extr,r} / (A \times m_u \times c))^2} [T;]$$

Axial Magnetic Structure Acceptance on Extraction Radius

$$A_z = \nu_z \times z^2 \times 10^3 / R_{extr,r} [pi.mm.mrad; mm, m]$$

$$k_{inacc} = R_{extr,r} / B \times dB_{inacc}$$

$$VacLosCoeF = VacSurface \times R_{extr,r}$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Holsinger R., Iselin C. CERN-POISSON Program Package (POISCR) User. Guide. Geneva, 1984 (unpublished).
2. ANSYS <http://www.ansys.com/>
3. OPERA/TOSCA Reference Manual. Oxford: Vector Fields Limited, 1994.
4. Dubrovin A. N. User's guide MERMAID: Magnet Design in Two and Three Dimensions. Novosibirsk Department, SIM Limited, 1994. P. 3–60.

5. Kukhtin V., Lamzin E., Sytchevsky S. Magnetic Field Formation in Cyclotrons on the Basis of 3D Numerical Simulations // Book of Abstracts XXXIV Eur. Cyclotron Progress Meeting (ECPM 2005), Oct. 6–8, 2005.
6. Sytchevsky S. et al. Numerical Technology for Design, Development & Measurements of Magnet Systems in Cyclotrons // Book of Abstracts XXXV Eur. Cyclotron Progress Meeting (ECPM 2006), Nov. 2–4, 2006.
7. Гульбекян Г.Г., Франко Й. Алгоритм синтеза и анализа характеристик магнитных структур изохронных циклотронов с цилиндрическими полюсами. Препринт ОИЯИ Р9-92-129. Дубна, 1992.
8. Franko J. et al. Physical-Technical Project of the Heavy Ion Accelerator of the Bratislava University (in Slovak). JINR, Dubna/UK, Bratislava, 1987.
9. Franko J. et al. Urýchľovač ťažkých iónov U 200 В. Fyzikálno-technické zdôvodnenie. UKJF 93/88. Bratislava, 1988.
10. Borisov O. N. et al. Циклотронная лаборатория (CyLab) при Словацком метрологическом институте. Препринт ОИЯИ Р9-97-86. Дубна, 1997.
11. Ivanenko I. et al. The Model of DC 72 Cyclotron Magnet. The Research of the Sector Shimming Methods for Obtaining the Working Magnetic Field for Light and Heavy Ions Acceleration // Proc. of Conf. 8th Eur. Particle Accelerator Conf. Paris, 2002.
12. Gikal B. N. et al. The Project of a Specialized Accelerator DC 60 Designed for the Interdisciplinary Laboratory Complex: Abstract // 3rd Intern. Conf. on Nuclear and Radiation Physics, Almaty, Kazakhstan, 2001. P. 52–53.
13. Gulbekyan G. G. et al. DC-350 Accelerator Complex // Phys. Part. Nucl. Lett. 2010. V. 7, No. 4. P. 256–272.
14. Gulbekian G. G. et al. A Method of the Magnetic Field Formation in Cyclotron DC-72 // Nukleonika. 2003. V. 48, No. 4. P. 207–210.
15. Gulbekyan G. et al. DC-72 Cyclotron Magnetic Field Formation // Proc. of Conf. «RuPAC 2004», XIX Rus. Particle Accelerator Conf., Dubna, 2004.

Получено 11 июля 2013 г.