

СОФТВЕРСКА АНАЛИЗА УЗРОКА ПРВОГ ХАРМОНИКА ЦИКЛОТРОНА ВИНСИ

Саша Ђирковић, Јасна Ристић-Ђуровић, Петар Беличев, *Институт за нуклеарне науке "Винча"*

Садржај – Феромагнетска структура Циклотрона ВИНСИ модификована је променом облика сектора тако да је ваздушни процеп између њих повећан на 36 mm. Номинално изохроно магнетско поље неопходно за убрзавање и извођење снопа јона H_2^+ од 30 MeV по нуклеону остварено је повећањем побудне струје главних калемова са 561 на 711 А. У измереном магнетском пољу константовано је постојање првог хармоника интензитета од 3 mT у централном делу машине. Овакво поље може не-повољно да утиче на динамику снопа наелектрисаних честица у тој области, а самим тим и на квалитет излазног снопа. Узрочници првог хармоника тражени су кроз детаљну анализу измерене мапе поља и хармонијску анализу четири софтверске мапе поља. Једна софтверска мапа поља добијена је заменом вредности измереног магнетског поља у кружном исечку од 90° између једног пара сектора пољем измереним између наспрамног пара сектора. Закључци донесени на основу ових анализа су потврђени накнадним премеравањем димензија и положаја сектора у склопу феромагнетске структуре Циклотрона ВИНСИ.

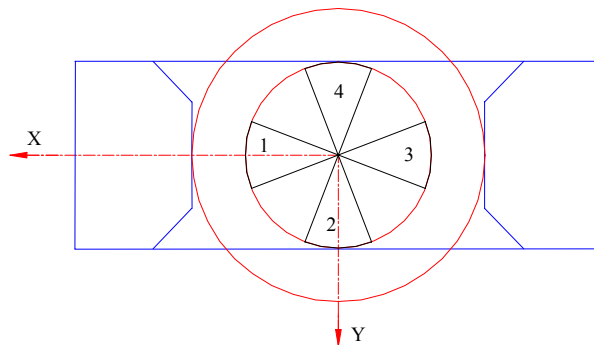
1. УВОД

После прве фазе мерења и изохронизације магнетског поља Циклотрона ВИНСИ [1] остао је нерешен проблем ниске вредности измереног поља у центру машине. Нови облик централног чепа [2] надокнадио је овај пад поља и успоставио задовољавајуће изохроно поље у центру машине. Осим тога магнетска структура је модификована и ради повећања трансмисије лаких јона. Грубо подешавање остварено је смањењем дебљине сектора, а фино променом бочног шима. Повећање ваздушног процепа између сектора са 31 на 36 mm довело је до очекиваног пада поља у медијалној равни циклотрона. Изохрона поља потребна за убрзавање јона жељене екстракционе енергије сада се добијају повећањем струје главних калемова и другачијом комбинацијом струја трим калемова.

Шема магнетске структуре Циклотрона Винси, с посебним освртом на ознаке парова сектора у координатном систему машине приказана је на сл. 1. Магнет Циклотрона ВИНСИ је компактан, пречника 2 m. Састоји се од следећих феромагнетских елемената: јарма, два поља, осам сектора и два централна чепа. Ова феромагнетска структура се побуђује са два пара главних калемова (по 256 навојака), са десет пари кружних трим-калемова и осам пари трапезоидних хармонијских калемова.

За другу фазу мерења магнетског поља Циклотрона ВИНСИ систем за мерење магнетског поља [3] је модификован тако да су проблеми који су се јављали током мерења поља у првој фази са угаоним позиционирањем мерне руке, односно Холове сонде, отклоњени. Сада се азимутално позиционирање контролише помоћу петнаес-

тобитног апсолутног енкодера који је смештен у центру машине дуж z-осе.



Сл. 1. Распоред сектора. Шематски приказ магнетске структуре Циклотрона ВИНСИ и распоред парова сектора у односу на координатни систем машине. Већи круг означава спољну границу главних калемова док мањи представља пол за који су причвршћени сектори. Пречник поља је 200 cm. Мерење целокупне мапе поља вршено је дуж пречника на угаоном исечку од 180° . Корак дуж радијуса био је 1 cm, а по углу 1° . Почетни азимутални положај се поклапа са x-осом, а мерење се обавља у смеру казаљке на сату.

У другој фази мерења магнетског поља измерено је поље са три различита профила сектора: s_6 , s_7 и s_8 . Изложени резултати анализе измереног поља односе се на последњи профил сектора s_8 .

2. ПРВИ ХАРМОНИК

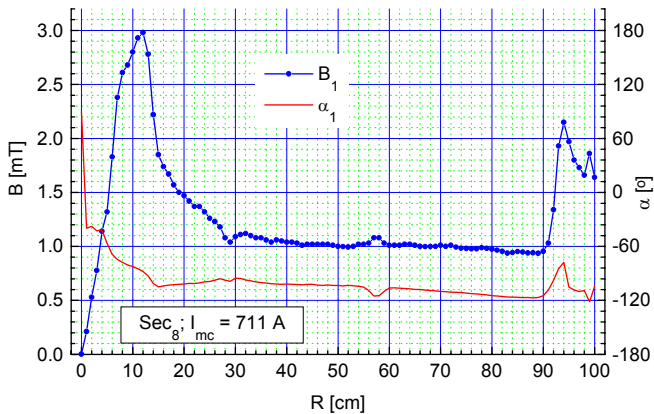
Облик магнетског поља у медијалној равни циклотрона $B(r, \theta)$ одређује орбите честица, а може се поделити на средње поље и азимутално осцилујући део поља који се обично приказује у облику Фуријевог реда:

$$B(r, \theta) = B_0(r) + \sum_{k=1}^{\infty} B_k(r) \cdot \sin[k\theta + \alpha_k(r)]. \quad (1)$$

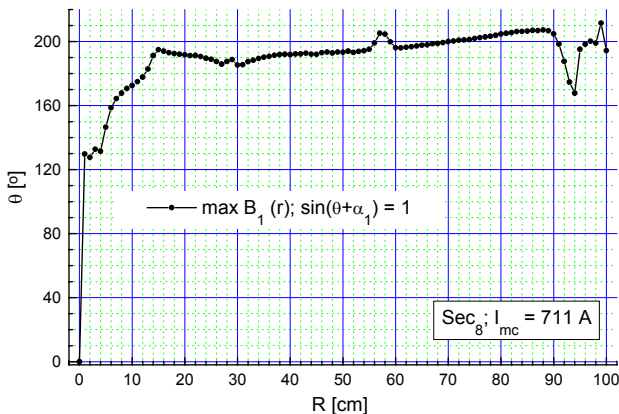
Услови убрзавања наелектрисаних честица на првим орбитама у централној области циклотрона битно утичу на даљи ток убрзавања и квалитет изведеног снопа. Изражен први хармоник магнетског поља у централној области неповољно утиче на динамику снопа јер изазива удаљавање центара орбита [4] снопа од центра машине.

Да би се задржала иста излазна енергија од 30 MeV по нуклеону приликом убрзавања номиналног снопа, тј. снопа честица H_2^+ , потребно је модификовану магнетску структуру са секторима профила s_8 побудити струјом главних калемова од 711 А. Хармонијска анализа резултата мерења овог поља урађена на основу једначине (1) показала је да је први хармоник неприхватљиво велики. Радијална зависност првог хармоника приказана је на сл. 2 где се види да је амплитуда првог хармоника

прилично изражена у централној области и за $R > 90$ cm, док је у убрзавајућој области прихватљива. Постојање првог хар-моника на крајњим радијусима пола циклотрона се може занемарити јер се налази на радијусима већим од радијуса екстракције ($R = 84$ cm). Дакле, забрињавајући интези-тет првог хармоника појављује се у централном региону машине, тј. за $6 \text{ cm} \leq R \leq 20 \text{ cm}$, ($R \approx 12 \text{ cm}$).



Сл. 2. Амплитуда и фаза првог хармоника Циклотрона ВИНСИ. Феромагнетска структура са секторима профила s_8 побуђена је струјом главних калема од 711 А, што одговара изохроном пољу из кога се екстрахују јони H_2^+ енергије 30 MeV по нуклеону. Угаони положај од 0° одговара x-оси на сл. 1 и смер пораста угла одговара смеру кретања казаљке на часовнику. Приказана вредност првог хармоника у центру машине може неповољно утицати на динамику снопа у тој области. Због тога је неопходно утврдити узроке овог хармоника и извршити његову корекцију.



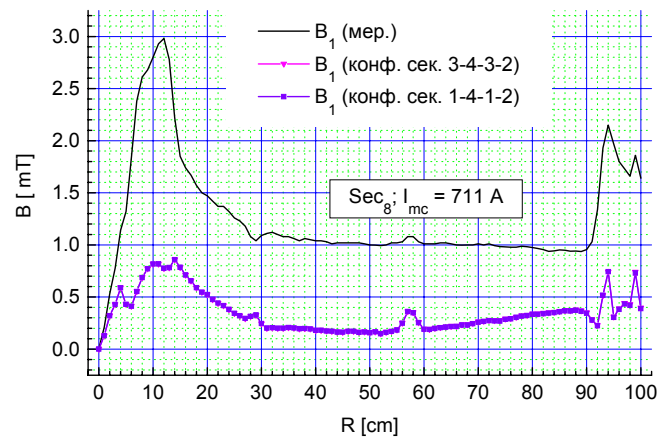
Сл. 3. Угаоно позиционирање максимума првог хармоника. График приказује азимутални и радијални положај максимума првог хармоника из једначине (1).

На сл. 2 приказана је и фаза првог хармоника. Знајући фазу првог хармоника могу се одредити угаони положаји који представљају максимуме и минимуме првог хармоника. Са сл. 2 види се да радијусу максималне амплитуде првог хармоника $R = 12 \text{ cm}$ одговара фаза од $\alpha_1 = -88^\circ$. То значи да је први хармоник проузрокован локалним повећањем поља на азимуту $\theta \approx 90^\circ + 88^\circ = 178^\circ$ или локалним смањењем поља на азимуту $\theta \approx -2^\circ$. Положај максимума првог хармоника приказан је на сл. 3 и

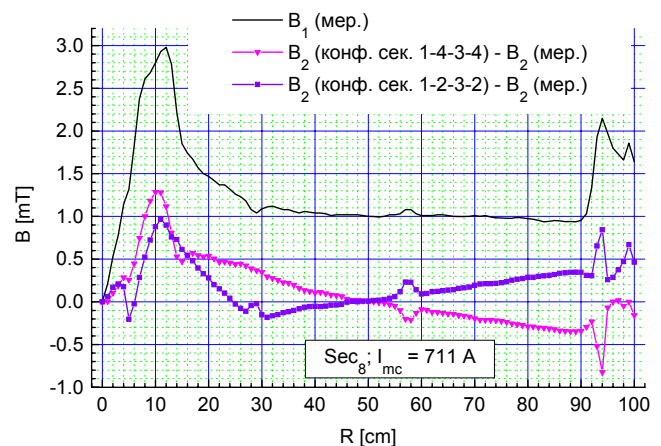
указује да узроке првог хармоника треба тражити на 3. или 1. пару сектора (сл. 1).

3. СОФТВЕРСКИ ЕКСПЕРИМЕНТ

На самој магнетској структури и у измереном магнетском пољу нису уочене неправилности предвиђене графикам са сл. 3. Због тога се приступило софтверском експерименту. На основу измереног магнетског поља, направљене су четири вештачке конфигурације магнетске структуре, односно четири вештачке мапе поља. Наиме, вршено је упаривање насупрних сектора, на пр. 1. пар сектора је заменио 3. пар сектора, па би сада конфигурација сектора са сл. 1 била 1-4-1-2 посматрано од x-осе у смеру кретања казаљке на сату. Упаривање је рађено тако што је измерено поље између једног пара сектора за кружне исечке од $90^\circ (\pm 45^\circ)$ од симетрале одговарајућег сектора и $R \in [0, 100] \text{ cm}$ замењено измереним пољем између другог пара сектора. Резултати хармонијске анализе овако добијених поља приказани су на сл. 4-7.

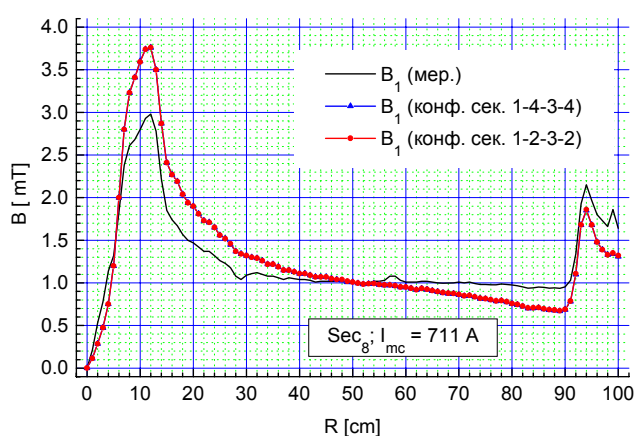


Сл. 4. Заједнички први хармоник 2. и 4. пара сектора. Упаривањем било 1. било 3. пара сектора добија се софтверска конфигурација сектора у којој први хармоник потиче само од 2. и 4. пара сектора.

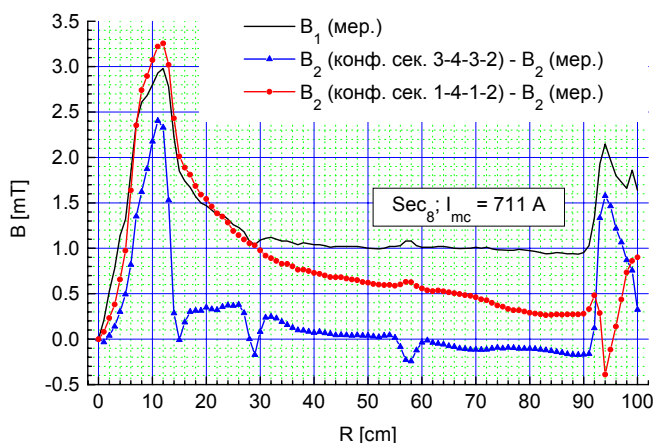


Сл. 5. Раздвојени први хармоник 2. и 4. пара сектора. Одузимањем других хармоника мапе софтверске конфигурације сектора и реалне мапе поља добија се први хармоник удвојеног пара сектора.

У случајевима када заменимо 1. пар сектора са 3. паром и обратно (конфигурације 3-4-3-2 и 1-4-1-2 респективно) добијамо конфигурације у којима први хармоник потиче само од 2. и 4. пара сектора. На сл. 4 се види да је први хармоник ових конфигурација далеко мањи од реалног случаја. За очекивати је, што се и уочава на истој слици, да се први хармоник у обе ове конфигурације поклапа. Одговор на питање који од ова два пара сектора, 2. или 4. пар, више утиче на стварање првог хармоника се може наћи на сл. 5. Наиме, први хармоник који потиче од 4. пара сектора постаје други хармоник упаривањем 4. пара сектора у конфигурацији 1-4-3-4. Одузимањем другог хармоника реалне мапе од другог хармоника ове конфигурације добија се први хармоник 4. пара сектора. График на сл. 5 указује да је први хармоник 4. пара сектора нешто већи у центру од првог хармоника 2. пара сектора.



Сл. 6. Заједнички први хармоник 1. и 3. пара сектора. На основу ових резултата и резултата приказаних на сл. 4 закључује се да узрок првог хармоника реалне конфигурације сектора треба тражити у разликама поља која стварају 1. и 3. пар сектора.

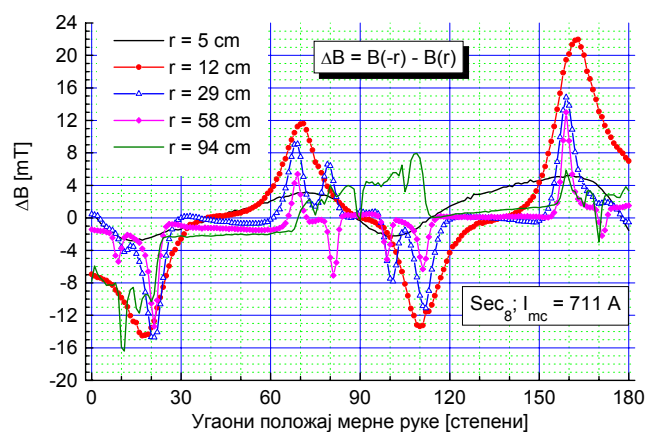


Сл. 7. Раздвојени први хармоник 1. и 3. пара сектора. Упаривање 1. пара сектора даје већи хармоник него упаривање 3. пара сектора. То указује да главни узрок првог хармоника реалне мапе поља лежи у 1. пар сектора.

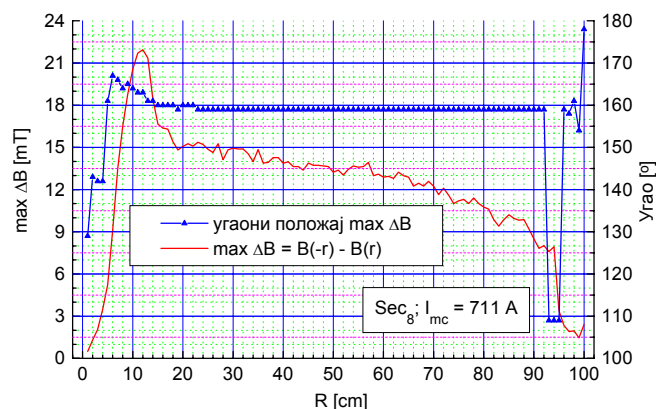
Графици на сл. 6 и 7 приказују заједнички и засебан утицај 1. и 3. пара сектора. Одмах се примећује на сл. 6 да је први хармоник софтверске мапе поља која потиче од 1. и 3. пара сектора знатно већи у централном делу од

одговарајућег хармоника реалне мапе поља. Појединачни утицај 1. и 3. пара сектора приказан је на сл. 7, где се види да је у овом случају већи први хармоник 1. пара сектора.

На основу резултата софтверских експеримената упаривања сектора, приказаних на сл. 4, 5, 6 и 7 дошло се до закључка да узроке првог хармоника треба тражити у разлици поља између 1. и 3. пара сектора. Како је угаона ширина сектора 42° за прецизније одређивање узрока првог хармоника приступило се прављењу разлике осно-симетричних тачака реалне мапе поља.



Сл. 8. Угаона расподела разлике поља осно-симетричних тачака. Ивице 1. и 3. пара сектора се налазе на угловима 21° и 159° док углови 69° и 111° представљају почетак и крај 2. и 4. пара сектора. Са слике се види да је скоро за сваки радијус највећа разлика када се мерна рука налази на ивицама сектора. Осцилације разлике поља осно-симетричних тачака које се појављују за неке друге углове, а за $r = 29, 58$ и 94 cm, потичу од вијака којима се прицвршћују сектори за полне плоче.



Сл. 9. Максимална вредност разлике поља осно-симетричних тачака и њен угаони положај. На скоро свим радијусима осим на пар почетних максимална вредност разлике поља осно-симетричних тачака појављује се само једанпут на неком угаоном положају мерне руке. Запажа се да облик криве максималне вредности разлике поља веома подсећа на први хармоник Циклотрона ВИН-СИ. Такође, угаони положај ове максималне разлике се налази на ивици 1. и 3. пара сектора.

Мерење мапе магнетског поља врши се дуж пречника ($R \in [-100, 100]$ cm) за 180 различитих положаја мерне руке с обзиром да је корак по азимуту 1° . Измерено поље на првој половини мерне руке има координате $B(-R, \theta)$, а на другој $B(R, \theta)$. Израчуната је разлика поља измереног у осно-симетричним тачакама за свих 180 положаја мерне руке. На сл. 8 приказана је горе поменута разлика за пет различитих радијуса. Намерно је изабран радијус $R = 12$ cm јер је први хармоник машине максималан на том радијусу. Са слике се види да је за $R = 12$ cm разлика поља 22 mT на угаоној позицији мерне руке од 163° , што значи да се мерна рука налази у непосредној близини правца ивица 1. и 3. пара сектора. Дакле поље на страни 3. пара сектора је веће за 22 mT од осно-симетричног поља измењеног између 1. пара сектора.

За сваки радијус (осим $R = 1$ и 3 cm) разлика поља осно-симетричних тачака има своју максималну вредност на само једној угаоној позицији мерне руке. Те вредности и њихови угаони положаји приказани су на сл. 9. Уочава се велика сличност између графика првог хармоника Циклотрона ВИНСИ и графика који приказује максималну вредност разлике поља измереног у осно-симетричним тачакама. Такође, на истој слици се види да је за већину радијуса вредност разлике поља осно-симетричних тачака максимална при угаоном положају мерне руке од 159° , што одговара правцу ивица 1. и 3. пара сектора.

4. ЗАКЉУЧАК

Процес шимовања сектора на Циклотрону ВИНСИ завршен је са секторима профила s_8 добијањем номиналног магнетског поља које обезбеђује извођење 30 MeV по нуклеону снопа јона H_2^+ . Због повећања ваздушног процепца између сектора са 31 на 36 mm, а с циљем задржавања исте излазне енергије јонског снопа, струја главних калема повећана је на 711 A.

Резултати хармонијске анализе измерене мапе магнетског поља указују на велики први хармоник у централном региону од 3 mT. Постојање првог хармоника у центру машине неповољно утиче на динамику снопа наелектри-саних честица и слаби квалитет излазног снопа. Да би се открили узроци првог хармоника најпре су одређени радијално зависни максимуми једначине (1), који указују на неправилност код 3. или 1. пара сектора (сл. 3). Затим је направљен софтверски експеримент са различитим упаривањем сектора. Хармонијска анализа ових мапа указала је да узрок првог хармоника лежи у разлици поља која постоје између 1. и 3. пара сектора, да већи први хармоник изазива 1. пар сектора (сл. 7) и да стога узрок појављивања првог хармоника треба тражити пре свега у 1. пар сектору, али и у 3. пар сектору. На крају је одређена максимална вредност разлике поља осно-симетричних тачака и њен угаони положај, који су приказани на сл. 9. Са слике се види да узрок првог хармоника машине потиче, пре свега, од разлике поља која постоји на углу од 159° , што одговара правцу на коме леже ивице 1. и 3. пара сектора. Максимални први хармоник од 3 mT на радијусу $R = 12$ cm проузрокује разлику поља на истом радијусу од 22 mT, која постоји

на углу од 163° . Наиме, магнетско поље на овој локацији између 1. пара сектора је мање за наведени износ од одговарајућег осно-симетричног поља између 3. пара сектора.

Накнадним премеравањем свих димензија сектора показало се да на 1. пар сектору постоји мањак материјала и да је горњи сектор мало смакнут у односу на доњи сектор. Ова мерења у потпуности потврђују наведене резултате и закључке изведене на основу измереног поља и поља добијених софтверским експериментом.

ЛИТЕРАТУРА

[1] С. Ћирковић, Ј. Ристић-Ђуровић, А. Добросављевић, "Резултати прве фазе мерења магнетског поља Циклотрона ВИНСИ," *Зборник радова 10. Конгреса физичара Југославије*, 2000, књига II, стр. 909-912.

[2] S. B. Vorozhtsov, A. S. Vorozhtsov, N. Nešković, J. Ristić-Djurović, S. Ćirković, V. Vujović, "Magnetic field simulation in the central region of the VINCY Cyclotron", *International Journal of Nuclear Research NUKLEONIKA*, Vol. 48, Supplement 2 (2003), *Proceedings of the XXXIII European Cyclotron Progress Meeting*, Warsaw and Krakow, September, 17-21, 2002, S39-S44.

[3] А. Добросављевић, С. Ћирковић, А. Здравковић, З. Урошевић, М. Лучић, М. Гемљевић, "Систем за мерење магнетског поља Циклотрона ВИНСИ", *XXXIX конференција ЕТРАН-а*, Златибор, 6-9. јун 1995, свеска IV, стр. 355-358.

[4] Г. Г. Гуљбекјан, И. А. Иваненко, А. М. Мордуев, Ђ. Франко, "Коррекция первой гармоники магнитного поля циклотрона У-400М," *Сообщения Объединенного Института Ядерных Исследований Дубна*, P9-97-191, 1997.

Abstract – The ferromagnetic structure of the VINCY Cyclo-tron has been modified. The sector thickness has been decreased and, consequently, the gap between the sectors has been enlarged to 36 mm. In order to obtain the nominal isochronous magnetic field necessary for 30 MeV per nucleon H_2^+ extraction, the main coils current has been increased from 561 A to 711 A. It was determined that the measured magnetic field had the first harmonic of 3 mT in the central region of the machine. Such a field can influence negatively the beam dynamics in the central region and, consequently, decrease the quality of the extracted beam. The cause of the first harmonic was searched for thorough the harmonic analysis of the measured magnetic field and four software made field maps. A software map was created by substituting a 90° quarter of the measured field between a chosen pair of sectors with the measured field quarter between the symmetrical pair of sectors. The conclusions of this analysis were confirmed by the measurements of the sectors dimensions and placements within the VINCY Cyclotron magnet.

SOFTWARE ANALYSIS OF THE REASON FOR THE FIRST HARMONIC OF THE VINCY CYCLOTRON

S. Ćirković, J. Ristić-Djurović P. Beličev