

ТЕСТИРАЊЕ НА СНАГУ ДИРЕКТНО СПРЕГНУТИХ РФ-ПОЈАЧАВАЧА УЗДУЖНО РАЗРЕЗАНИМ КООКСИЈАЛНИМ ВОДОМ

Иван М. Трајић, Бошко Бојовић, Институт за нуклеарне науке ВИНЧА

Садржај – Приказан је нов начин тестирања директно спрегнутих РФ-појачавача коришћењем уздужно разрезаног коаксијалног вода. Такав вод затвара кабинет радиофреквентног појачавача и са њим чини $\lambda/2$ -ску резонантну структуру. Прорез служи за повезивање водом хлађеног вештачког оптерећења (од $50 \Omega / 40 \text{ kW}$) паралелно краткоспојнику, омогућавајући добијање захтеване импедансе у анодном колу тетроде за цео фреквентни опсег рада појачавача од 17 MHz до 31 MHz променом места спајања оптерећења дуж линије. Решење је коришћено за тестирање каскодног појачавача РФ-система (50 kW) Циклотрона ВИНСИ много пре састављања резонатора.

1. УВОД

Акцелераторска инсталација ТЕСЛА, чија је изградња у току у Институту за нуклеарне науке ВИНЧА, састоји се из три машине: компактног изохроног циклотрона ВИНСИ, тешкојонског извора мВИНИС и лакојонског извора пВИНИС и бројних ниско и високоенергетских експерименталних канала.

Циклотрон ВИНСИ је пројектован као вишенаменска машина и уз наведене јонске изворе ће се користити у основним и примењеним истраживањима у физици, хемији, биологији, развоју нових материјала, нуклеарној технологији, производњи радиоизотопа, производњи радиофармацеутика и протонској терапији [1].

2. РАДИОФРЕКВЕНТНИ СИСТЕМ

Два основна дела радиофреквентног (РФ) система циклотрона су РФ-резонатор и РФ-појачавач. РФ-систем циклотрона ВИНСИ се састоји из два РФ-резонатора, од којих се сваки напаја посебним појачавачким ланцем, сигурносног и управљачког подсистема [2].

РФ-резонатори су $\lambda/4$ -ског типа, са резонантном фреквенцијом у опсегу од 17 MHz до 31 MHz. Груба промена сопствене учестаности РФ-резонатора се остварује померањем краткоспојника, а фино подешавање закретањем тример-петље [3].

Сваки од појачавачких ланаца се састоји од три појачавача и заједничког синтезатора фреквенције. Први степен је стандардни широкопојасни појачавач, намењен за КТ опсег рада, преправљен за рад до 31 MHz и са додатним предпојачавачем на улазу тако да се може побудити сигналом из синтезатора фреквенције. Други и трећи степен су побудни и излазни појачавачи у каскодној конфигурацији, израђени у Лабораторији за физику, Института за нуклеарне науке ВИНЧА [4]. Побудни појачавач је реализован тетродом (20 kW) у спрези са уземљеном катодом, а излазни појачавач је реализован тетродом (75 kW) у спрези са уземљеном решетком. Излазни појачавач је директно спрегнут са РФ-резонатором спрежним подсистемом [5]. Код директне спреге кабинет излазног појачавача са

резонантним продужетком и спрежном линијом чини $\lambda/2$ -ску резонантну структуру (Сл. 1 а).

Спрежни подсистем РФ-система има задатак да снагу из појачавача пренесе резонатору. У случају индуктивне спреге, подсистем за спрегу се састоји из спрежног вода и спрежне петље. Систем РФ-појачавача и РФ-резонатора, који су индуктивно спрегнути, се може посматрати као трансформатор у коме је појачавач примар, а резонатор секундар. С обзиром на конструкцију систем се посматра као коло са расподељеним параметрима и описује једначинама теорије водова.

3. ДИРЕКТНА СПРЕГА

У случају директне спреге резонантна учестаност појачавача и резонатора су исте. Амплитудска карактеристика одговара систему два индуктивно спрегнута осцилаторна кола са истом резонантном учестаношћу. Радна учестаност РФ-система се бира на нули карактеристике.

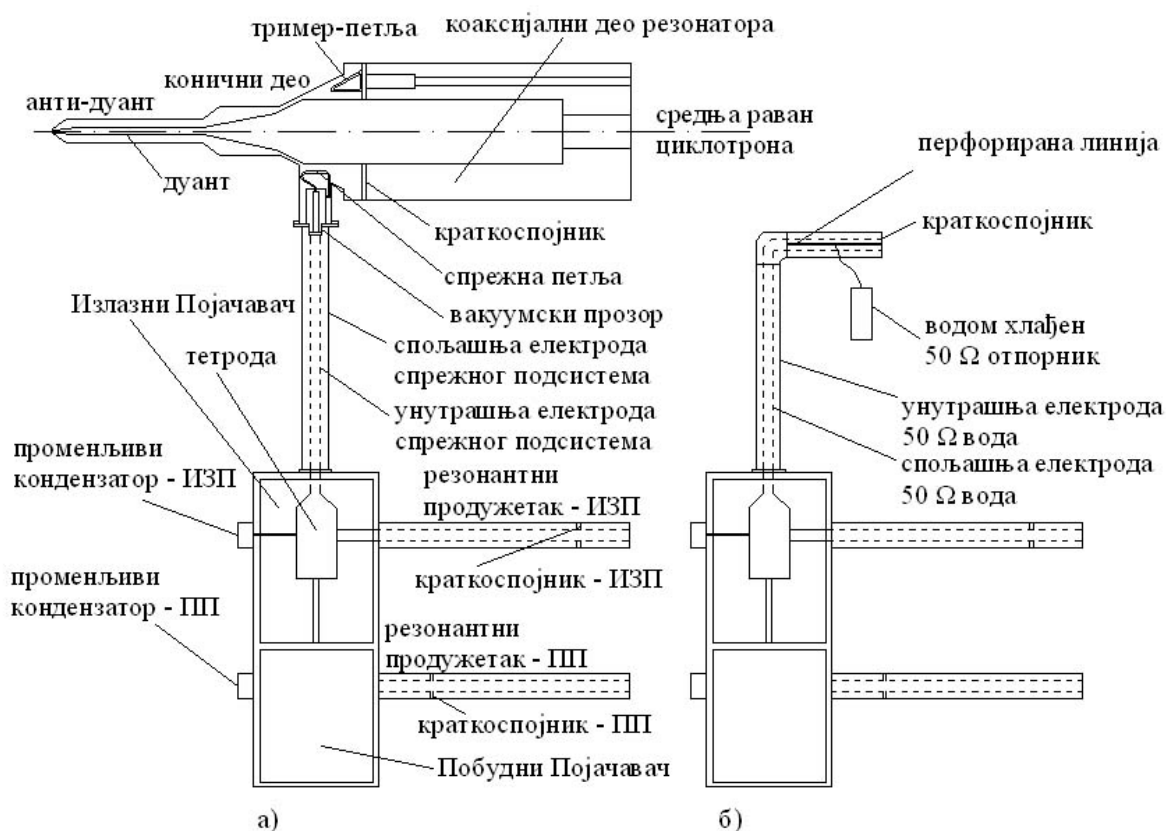
Конвенционални начин промене трансформаторског односа примар - секундар код директно спреге је варирање положаја спрежне петље, док су сопствене учестаности оба резонатора једнаке. Таква конфигурација има две слабости. Прво, у случају високонапонског пробоја између дуанта и антидуанта, секундар је за кратко време кратко спојен на свом отвореном крају, а примар постаје виртуелно изолован од секундара са полом на његовој сопственој учестаности и који је сада управо на радној учестаности. Вредност импедансе коју види анода у том тренутку скочи са вредности од стотињак Ω на неколико десетина k Ω . Ови скокови, и поред брзог електронског система за заштиту тетроде, знатно скраћују њен радни век. Друга слабост је поменута потреба за померањем спрежне петље у вакууму да би се регулисао однос напона анода-дуант, што је везано за проблеме са електричним пражњењима и ломовима вакуумског прозора.

Излазни степен РФ-појачавача, који се користи у директној спрези се скоро искључиво, пројектује и израђује самостално, јер је тестирање појачавача у директној спрези повезано са постојањем оптерећења, односно резонатора. Наиме, проблем се јавља при тестирању појачавача, уколико нема резонатора. Стога произвођачи појачавача, по правилу, не прихватају израду појачавача за директну спрегу.

4. СПРЕГА СА РАЗДЕШЕНИМ ПРИМАРОМ

Са циљем превазилажења поменутих слабости, дошло се на идеју да се напонски однос анода-дуант, у директној спрези, мења раздешавајући сопствену учестаност примара (РФ-појачавач) у односу на секундар (РФ-резонатор). Мењајући раздешење, такође можемо мењати и напонски однос анода-дуант. На овај начин, померање спрежне петље није потребно. Прилагођење импедансе и жељени однос напона између аноде и дуанта

добија се само једним покретним елементом – променљивим



Сл.1. а) Спрега са раздешеним примаром б) Тестирање РФ-појачавача уздужно разрезаним коаксијалним водом.

кондензатором у паралели са анодом појачавача (као на Сл. 1 а). На овај начин превазилазе се сви проблеми везани за померање спрежне петље у вакууму.

За циклотрон ВИНСИ развијен је оригиналан начин директне спреге појачавача и резонатора, назван спрега са раздешеним примаром. Амплитудска карактеристика одговара систему два индуктивно спрегнута осцилаторна кола са различитим, али блиским резонантним учестаностима. Резонантне учестаности појачавача и резонатора нису исте, а радна учестаност се бира на полу карактеристике. У овом случају, положај спрежне петље је непроменљив, а жељени напонски однос анода - дуант добија се раздешавајући сопствену учестаност кабинета појачавача (примар) у односу на сопствену учестаност РФ-резонатора (секундар), не мењајући при томе коефицијент спреге. Кабинет појачавача заједно са спрежним водом и хоризонталним резонантним продужетком чини полуталасни резонатор (Сл. 1 а). Један кратак спој представља петља на крају спрежног вода, а други клизни краткоспојник на крају хоризонталног резонантног продужетка. Снага се предаје РФ-резонатору који је $\lambda/4$ -ска резонантна структура, индуктивном односно трансформаторском спрегом преко заједничког магнетног поља РФ-резонатора и петље, а која улази у резонатор. Напонски однос анода - дуант мења се раздешавајући сопствену учестаност појачавача (примар) у односу на РФ-резонатор (секундар) [3], [4], [5].

Израђени излазни и побудни степен РФ-појачавача, који се користи у спрези са раздешеним примаром је

сличан РФ-појачавачима који се користе за директну спрегу.

5. ТЕСТИРАЊЕ ДИРЕКТНО СПРЕГНУТИХ ПОЈАЧАВАЧА

За тестирање директно спрегнутог појачавача неопходно је оптерећење. Као оптерећење се користи резонатор, па је тест појачавача био уско повезан са изградом резонатора.

У оквиру сарадње са ЦЕРН-ом започето је пројектовање и израда излазног и побудног појачавача, као завршног степена РФ-система. Услед санкција, сарадња је прекинута и пројектовање и израда појачавача је настављена (и завршена) у Институту за нуклеарне науке ВИНЧА. У току 1998. године завршена је израда првог појачавача и поставио се проблем његовог тестирања. РФ-резонатори у том тренутку нису били израђени.

Решење овог проблема смо нашли у коришћењу уздужно разрезаног коаксијалног вода који затвара кабинет појачавача и са њим сачињава $\lambda/2$ -ску резонантну структуру [6]. Колико је нама познато, из доступне литературе, ово је нов начин тестирања директно спрегнутих РФ-појачавача.

6. УЗДУЖНО РАЗРЕЗАНИ КОАКСИЈАЛНИ ВОД

РФ-појачавач има два елемента за подешавање (Сл. 1 а): резонантни продужетак са клизним

краткоспојником и променљиви вакуумски кондензатор. Елементи за подешавање служе осим за остваривање $\lambda/2$ -ске резонантне структуре, на одговарајућој фреквенцији, и за избегавање виших модова [4], [7]. Импеданса оптерећења на тетроди треба да има реалну вредност или вредност што ближе реалној (отпорно оптерећење), а вредност око 2 k Ω . Вредност импедансе оптерећења на тетроди излазног појачавача одређена је прорачуном и мерењима на моделу, у складу са захтевом за максимални напон на дуанту, жељеним преносним односом индуктивне спреге и величином раздешења појачавача (примара) и резонатора (секундара). РФ-појачавач ће, према прорачуну, у спрези са резонатором радити у класи Ц, максимална излазна снага је 50 kW, при анодном РФ-напону од 10 kV. Резонантна структура (када тетрода "види" реалну импедансу) у $\lambda/2$ -ској структури се постиже наведеним елементима за подешавање. Фактор добротe кабинета РФ-појачавача (неспрегнутог са резонатором) је око 1000 (у зависности од фреквенције), што даје губитке од око 0,3 kW. Са циљем повећања потрошње може се додати, у паралели са кратким спојем коаксијалног вода карактеристичне импедансе од 50 Ω , водом хлађено отпорно оптерећење (Сл. 1 б). Фактор добротe (односно губици у колу или потрошња) кабинета РФ-појачавача се могу подесити померањем отпорника дуж коаксијалног вода. Распoдела напона дуж резонантне структуре има изглед приближан косинусној зависности од 0 V, код кратког споја, до 10 kV, на месту тетроде, што значи да се потрошња кола може подесити променом положаја отпорног оптерећења дуж коаксијалног вода од вредности блиских нули до веома високих вредности.

Променљиви положај отпорног оптерећења се остварује уздужним разрезивањем коаксијалног вода (Сл. 2), који је део резонантне структуре. У тако добијен прорез може се убацити клизни контакт са конектором који служи за повезивање водом хлађеног отпорног оптерећења (у нашем случају и на Сл. 2 је 50 Ω / 40 kW). Избор вредности отпорника и његове снаге зависи од излазне снаге РФ-појачавача и није условљен конструкцијом предложеног решења. РФ-појачавач је у тесту на снагу радио у класи АБ.



Сл.2. Фотографија водом хлађеног 50 Ω / 40 kW отпорника повезаног са уздужно разрезаним коаксијалним водом спојеним за тестирање излазног и побудног РФ-појачавача.

Вредност параметра која није била позната је дужина уздужно разрезаног дела коаксијалног вода за прихват отпорног оптерећења, а за захтевану излазну снагу

РФ-појачавача. За добијење снаге од 40 kW потребно је оптерећење поставити на место где је ефективна вредност РФ-напона

$$U = 1400 \text{ V} \wedge R = 50 \text{ } \Omega \Rightarrow P = \frac{U^2}{R} = 40 \text{ kW} \quad (1)$$

уколико предпоставимо да унети отпорник не мења значајније расподелу напона дуж линије. Прорачун базиран на теорији водова, без губитака, показује да за дати фреквентни опсег и тражену снагу дужина разрезаног дела треба да буде између 200 mm и 400 mm, мерено у односу на краткоспојени део коаксијалног вода.

Радне тачке РФ-појачавача, односно позиције подешавајућих елемената, одређене су, за различите фреквенције, мерењима сигнаlima ниског нивоа на моделу резонатора спрегнутог са РФ-појачавачем [3], [4], [5]. Извршена мерења су такође показала оправданост претпоставке да унети отпорник не ремети значајније расподелу напона у воду, за места прикључења од интереса за тестирање појачавача.

Из практичних разлога, да би израда и подешавање били што лакши, одлучили смо да израдимо разрезани део коаксијалног вода у дужини од приближно 800 mm.

Израђени уздужно разрезани коаксијални вод је омогућио тестирање РФ-појачавача циклотрона ВИСИ много пре израде РФ-резонатора [8].

Осим уздужно разрезаног коаксијалног вода и самог споја коаксијалног конектора на унутрашњи и спољашњи проводник разрезаног вода сви остали делови укључујући каблове, конекторе, колена и коаксијални вод дужине 1 m и водом хлађено оптерећење су стандардни расположиви делови.



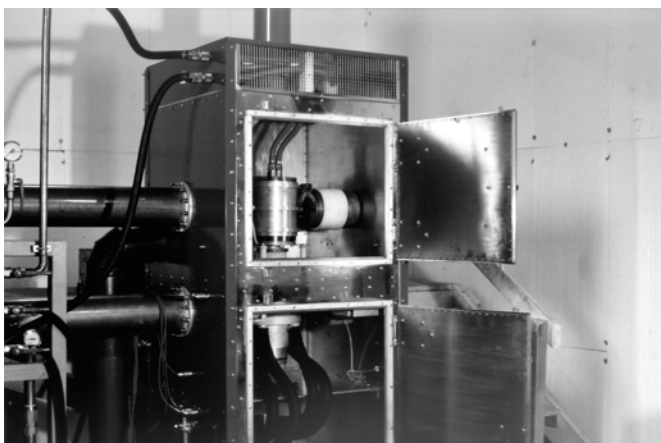
Сл.3. Детаљ споја стандардних елемената коаксијалног вода карактеристичне импедансе 50 Ω , колена и линије дужине 1 m, настављених уздужно разрезаним коаксијалним водом исте импедансе.

Спој коаксијалног конектора на унутрашњи и спој на спољашњи проводник разрезаног вода је остварен бакарним обујмицама са вијцима за притезање (Сл. 3). На тај начин остварен је добар електрични спој, а померање је омогућено отпуштањем вијака. Подешавање одговарајуће импедансе за задату излазну снагу појачавача се остварује мерењем импедансе на аноди тетроде, односно цилиндричном раздвојном кондензатору. Коаксијални кондензатор раздваја једносмерни напон напајања аноде и излазни РФ-напон

(Сл. 4). Ширина разреза, за разлику од дужине, диктирана је конструктивним разлозима и приступачности вијка за притезање споја унутрашњег проводника коаксијалног конектора са унутрашњим проводником коаксијалног вода.

7. ТЕСТИРАЊЕ РФ-ПОЈАЧАВАЧА ЦИКЛОТРОНА ВИНСИ

Описано решење у комбинацији са стандардним деловима коаксијалних водова, коленом и правим сегментом дужине 1 m, је успешно искоришћено у тестирању првог излазног и побудног РФ-појачавача циклотрона ВИНСИ. Нажалост, на располагању смо имали само оптерећење максималне снаге 40 kW и то је једини разлог чињенице да појачавачи нису тестирани



Сл.4. Изглед завршеног излазног и побудног појачавача. На врху кабинета појачавача види се део коаксијалног вода који је искоришћен за тестирање појачавача, на снагу.

на максималној излазној снази (50 kW). Излазна снага је мерена на три различита начина: калориметријски - на бази познатог протока воде за хлађење и мерењем температуре воде за хлађење на улазу и излазу из оптерећења; директно - мерењем излазног РФ-напона на аноди излазног појачавача, уз познату вредност оптерећења и дирекционим спрегником је мерена снага у близини споја оптерећења. Вредности снаге добијене помоћу ова три метода се разликују за мање од 10 %. Мерења снаге су такође потврдила прорачунску вредност губитака у кабинету излазног РФ-појачавача (око 0,3 kW).

8. ЗАКЉУЧАК

РФ-систем циклотрона ВИНСИ користи оригинални тип директне спреге између појачавача и резонатора - спрегу са раздешеним примаром. Излазни и побудни појачавач у каскодној спрези је израђен много пре израде РФ-резонатора. Решење са уздужно разрезаним коаксијалним водом и одговарајућим отпорним оптерећењем нам је омогућило успешно изведено тестирање РФ-појачавача на снагу. Штавише, решење омогућава тестирање било које врсте директно спрегнутог појачавача пре израде резонатора (оптерећење).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] N. Nešković et al., Nukleonika 48, Suppl. 2 (2003) S135.
- [2] I. Trajić, M. Obradović, M. Đurić, V. Drndarević, R. Rodić, S. Spasojević, Z. Golubičić, V. Smiljaković, B. Samardžić, B. Bojović, A. Susini, G. Primadei, "Amplifier chains, safety subsystem and control subsystem of the VINCY Cyclotron", Proc. XII Inf. Meeting on the TESLA Accelerator Installation, VINČA Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Yugoslavia, June 5-6, 1997.
- [3] Boško P. Bojović, Prilog proračunu radiofrekventnog sistema ciklotrona sa eksperimentalnom proverom metoda, doktorska disertacija, ETF Univerziteta u Beogradu, 1998.
- [4] P. Родић, М. Ђурић, Б. Бојовић, И. М. Трајић: Високофреквентни (ВФ) појачавач снаге 30 kW / 50 kW, Zbornik radova XL ETRAN, Sv. I, str. 27-30, Društvo za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku, Budva, 4 - 7. jun 1996.
- [5] B. Bojović, B. D. Popović, Detuned primary RF coupling system for variable frequency cyclotrons, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A 413 (1998) 7.
- [6] B. Bojović, I. Trajić, P. Beličev: Slotted line power testing of the directly coupled RF amplifiers, Proceedings of the 17th International Conference on Cyclotrons and their Applications, Tokyo, Japan, October 18-22, 2004, in press
- [7] Boško Bojović, Petar Beličev, Ivan Trajić: Problem viših modova u kabinetu RF pojačavača ciklotrona i rešenje za ciklotron VINCY, Zbornik radova XLIV ETRAN, Sv. I, str. 46-49, Društvo za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku, Sokobanja, 26 - 29. jun 2000.
- [8] V. Drndarević, M. Obradović, B. Samardžić, M. Đurić, B. Bojović, I. M. Trajić, Z. Golubičić, V. Smiljaković: Realizacija pojačavača snage, kontrolnog i sigurnosnog podsistema radiofrekventnog sistema Ciklotrona VINSI, Zbornik radova XL ETRAN, Sv. I, str. 23-26, Društvo za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku, Budva, 4 - 7. jun 1996.

Abstract – A new method for testing directly coupled RF amplifiers via longitudinally slotted coaxial line is presented. Such a line closes the radiofrequency amplifier cabinet and they jointly form a $\lambda/2$ resonant structure. The slot accommodates a water cooled dummy load ($50 \Omega / 40 \text{ kW}$) in parallel to the short-circuiting plate enabling one to achieve required impedance in the anode circuit of the tetrode for the whole frequency range of the amplifier from 17 MHz to 31 MHz by changing the position of the dummy load connection along the line. This solution was used to test the cascode amplifier (50 kW) of the RF system of the VINCY Cyclotron a long before the assembling of its cavities.

POWER TESTING OF DIRECTLY COUPLED RF AMPLIFIERS BY LONGITUDINALLY SLOTTED COAXIAL LINE

Ivan M. Trajić, Boško Bojović