

УДК 621.385.624

ГЕНЕРАТОР НА ДВУХЗАБОРНОМ РЕЗОНАТОРЕ С МОНОТРОННЫМ ЭФФЕКТОМ В ПЕРВОМ ПРОСТРАНСТВЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Т. А. Глебова, к.ф.-м.н., доцент кафедры ЭП РГРТУ, tatglebova@yandex.ru

А. А. Шишков, к.т.н., доцент кафедры ЭП РГРТУ, tatglebova@yandex.ru

В. И. Юркин, к.т.н., доцент кафедры ЭП РГРТУ, yurkin_vi@inbox.ru

Рассматривается генератор СВЧ с одним двухзаборным резонатором, работающим на синфазном виде колебаний, с монотронным эффектом в первом зазоре. Целью работы является исследование возможности увеличения КПД такого генератора и условий обеспечения эффективного режима его работы. Этот зазор представляет собой протяжённое пространство взаимодействия с углом пролёта, большим $2,4\pi$, и является эффективным группирователем электронов, позволяющим при больших амплитудах СВЧ напряжения получить относительную амплитуду первой гармоники конвекционного тока более 1,5. Дополнительным фактором увеличения КПД прибора является отбор энергии от электронного потока за счёт монотронного эффекта в этом пространстве. Обсуждаются условия эффективного режима работы. Предложен способ получения необходимого соотношения амплитуд СВЧ напряжения на зазорах при высоких значениях характеристического сопротивления резонатора. Проведены численные расчёты и анализ электронных процессов, показавшие возможность получения КПД по мощности в нагрузку около 55 %.

Ключевые слова: генератор, двухзаборный резонатор, синфазный вид колебаний, монотронный эффект, протяжённое пространство взаимодействия, большие амплитуды напряжения, КПД.

DOI: 10.21667/1995-4565-2016-57-3-151-156

Введение

Известные двухрезонаторные и двухзаборные однорезонаторные генераторы, работающие преимущественно на противофазном виде колебаний [1-3], как и двухрезонаторные усилительные клистроны, имеют КПД, не превышающий 20 % [2], за исключением генератора усложнённой конструкции [3] π -вида колебаний, в котором КПД достигает 28 %. В меньшей степени распространены генераторные клистроны «с плавающей трубкой дрейфа» [4], работающие на синфазном виде колебаний. Их КПД также не превышает 20 %. В этих генераторах амплитуда СВЧ напряжения на первом узком зазоре резонатора гораздо меньше, чем на втором зазоре. Для получения оптимального соотношения амплитуд напряжений на зазорах увеличивают ёмкость первого зазора за счёт изменения его геометрии, что является недостатком, так как при этом уменьшаются характеристическое сопротивление и собственная добротность резонатора, что приводит к уменьшению его эквивалентного сопротивления. В результате снижаются контурный и общий КПД прибора. Другим недостатком этого и других двухзаборных генераторов является потеря мощности СВЧ колебаний в резонаторе на скоростную модуляцию электронного

потока в первом зазоре. В данной статье рассматривается генератор с двухзаборным резонатором, работающим на синфазном виде колебаний, отличающийся тем, что длина первого зазора, который следует называть протяжённым пространством взаимодействия (ПВ), и соответственно угол пролёта выбираются из условия получения в нём отрицательной электронной проводимости (монотронный эффект), то есть в 5-6 раз большими, чем в обычных клистродах. Таким образом, при выполнении функции модуляции электронного потока по скорости и плотности одновременно в этом пространстве, а не только во втором зазоре, происходит отбор мощности от электронного потока СВЧ полем, что в конечном счёте увеличивает электронный КПД генератора. Показано, что на длине волны 12,24 см он может достигать 57 %.

Особенности конструкции резонатора и определение условий эффективной работы генератора

Эскиз двухзаборного резонатора с протяжённым первым пространством взаимодействия приведён на рисунке 1.

Там же даны обозначения размеров и структура электрического поля СВЧ.

Для эффективного группирования электронов величина угла пролёта θ_1 в первом ПВ выбирается больше, чем оптимальная с точки зрения получения максимального для монотрона значения электронного КПД, и равна:

$$\theta_1 = \gamma d_1 = (2,4 - 2,7)\pi, \quad (1)$$

где d_1 – длина пространства взаимодействия первого зазора;

$$\gamma = \frac{\omega}{v_0} = \frac{3170}{\lambda \sqrt{U_0}}, \quad \omega \text{ – круговая частота,}$$

$v_0 = 5,95 \cdot 10^7 \sqrt{U_0}$ – скорость электронов на входе в пространство взаимодействия первого зазора, см/с, U_0 – ускоряющее напряжение, В, λ – рабочая длина волны, см.

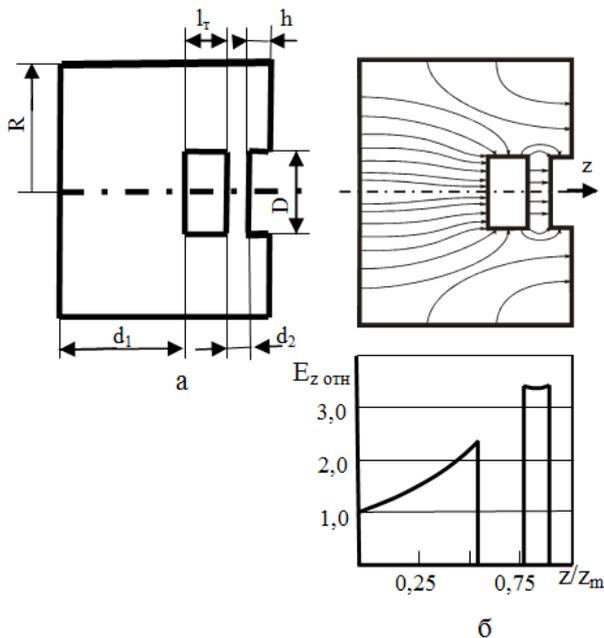


Рисунок 1 – Двухзазорный резонатор (а) и структура электрического поля в нем (б) на синфазном виде колебаний

Вследствие большого угла пролёта в первом ПВ возникает отрицательная активная электронная проводимость, то есть в нём осуществляется отбор мощности от электронного потока, как в монотроне. Эффективное группирование электронов, которое начинается в этом пространстве и продолжается в трубе дрейфа, обеспечивается при относительной амплитуде СВЧ напряжения на зазоре $\xi_1 = U_{m1}/U_0$ в пределах от 2,4 до 2,8 на таком расстоянии от первого зазора, при котором соблюдаются оптимальные условия отбора энергии от сгруппированного электронного потока во втором зазоре резонатора. Так как при углах пролёта θ_1 больше 2π коэффициент взаимодействия становится отрицательным, то эти условия оказываются такими же, как для традиционного однорезонаторного генератора с узки-

ми зазорами на π -виде колебаний, то есть угол пролёта между центрами зазоров должен быть равен

$$\theta_{12} = \gamma l_{12} = 2\pi(n + 0,25), \quad (2)$$

где $n = 0, 1, 2, \dots$ – номер зоны генерации, l_{12} – расстояние между центрами зазоров.

В реальной конструкции приведённое расстояние γl_{12} должно быть меньше величины, определяемой соотношением (2), из-за провисания потенциала под действием пространственного заряда и влияния больших амплитуд СВЧ напряжения в первом ПВ. Угол пролёта во втором зазоре выбирается таким же, как в узкополосных клистронах $\theta_2 < 0,4\pi$. Относительная амплитуда СВЧ напряжения на этом зазоре $\xi_2 = U_{m2}/U_0$ не превышает величину, равную 1,25. Для получения указанных значений амплитуд СВЧ напряжения на зазорах резонатора требуется ток, величина которого выбирается из условия: $I_0 = (12-16)U_0/\rho Q_n$, где ρ – характеристическое сопротивление, Q_n – нагруженная добротность резонатора. Такой ток можно получить в многолучевой ЭОС, позволяющей обеспечить заданную мощность при меньшем ускоряющем напряжении и большем контурном и общем КПД.

В отличие от генератора [4], у которого амплитуда U_{m1} меньше, чем амплитуда U_{m2} , в рассматриваемом приборе амплитуда U_{m1} в 2,2-2,4 раза больше амплитуды U_{m2} . Для получения такого режима работы генератора предлагается в области второго зазора сделать выступ пролётной трубы внутрь резонатора. Длина выступа h выбирается равной $(0,04 - 0,06)\lambda$. Преимущество такого способа получения необходимого соотношения амплитуд на зазорах резонатора заключается в увеличении эквивалентной индуктивности в области второго зазора и, следовательно, увеличении характеристического сопротивления резонатора. Примеры зависимостей отношения амплитуд напряжений на зазорах U_{m1}/U_{m2} и характеристического сопротивления на оси резонатора ρ_0 от относительного размера выступа выходной пролётной трубы h/λ показаны на рисунке 2.

При использовании многолучевой ЭОС характеристическое сопротивление вычисляется для каждого ряда, на котором располагаются электронные лучи.

Электрическое СВЧ поле в первом зазоре при этом оказывается неравномерным, нарастающим в направлении движения электронов. На рисунке 1,б приведено распределение продольной составляющей напряжённости электрического СВЧ поля в резонаторе на уровне стенок пролётных каналов, которые размещаются в

пролётных трубах в несколько рядов на концентрических окружностях.

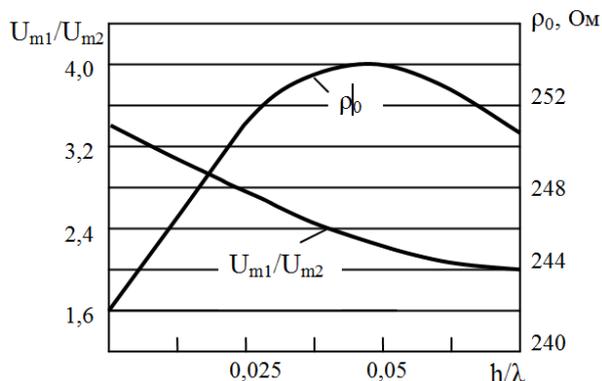


Рисунок 2 – Зависимость U_{m1}/U_{m2} и ρ_0 от относительной длины выступа h/λ в двухзазорном резонаторе

Диаметр D пролётных труб выбирается в пределах $(0,2 - 0,5)\lambda$, что позволяет разместить в них необходимое число пролетных каналов с электронными лучами и соответственно обеспечить получение тока, необходимого для эффективной работы прибора. Меньшие значения коэффициентов при выборе размера D соответствуют большим длинам волн.

Длина трубы дрейфа l_T выбирается из условия получения максимального значения относительной амплитуды первой гармоники конвекционного тока I_{m1}/I_0 на входе во второй зазор резонатора при одновременном выполнении оптимальных фазовых условий самовозбуждения генератора при работе на первой зоне генерации ($n=1$):

$$l_T = l_{12} - 0,5(d_1 + d_2) = (0,75 - 1)\pi / \gamma. \quad (3)$$

Заметим, что эти условия могут не совпадать при реализации оптимального режима работы прибора.

Численные расчеты показывают, что при использовании такого протяжённого группирователя в сочетании с большими амплитудами СВЧ напряжения и неоднородным электрическим полем, в пространстве взаимодействия возможно получение относительной амплитуды первой гармоники конвекционного тока в конце первого зазора, равной $I_{m1}/I_0 = 0,9 - 1,0$, а после прохождения трубы дрейфа, то есть на входе во второй зазор, она может достигать величины $I_{m1}/I_0 = 1,4 - 1,55$. Сказанное подтверждается на рисунке 3, где приведено изменение I_1/I_0 в протяжённом ПВ, и за его пределами для варианта $\gamma d_1 = 7,36$ рад равно $2,8\pi$. Таким образом, в первом ПВ происходит предварительное группирование электронов, которое продолжается в пространстве дрейфа. Соответственно КПД

прибора повышается на 10-15 % по сравнению с традиционными двухзазорным однорезонаторным и двухрезонаторным клистроном.

Дополнительное увеличение КПД получается за счёт отбора от электронного потока до 5 % подводимой мощности $P_0 = I_0 U_0$ в первом пространстве взаимодействия.

Исследование электронных процессов в генераторе

Численное моделирование электронных процессов проводилось по программе, основанной на двумерной модели электронного потока из деформируемых частиц и метода конечных разностей для расчёта внешних электрических полей и поля пространственного заряда. Программа позволяет оптимизировать по максимуму КПД значения амплитуд СВЧ напряжения и приведённой длины ПВ генератора.

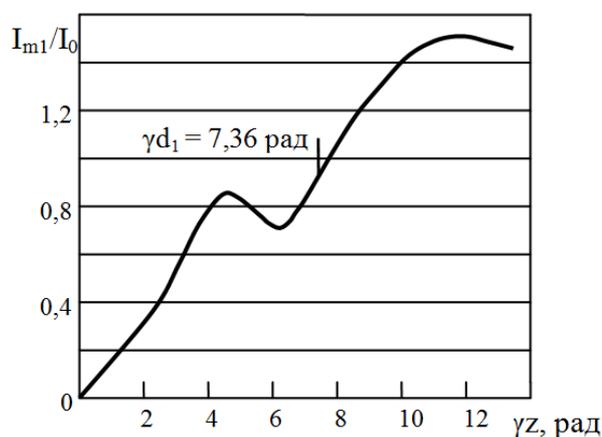


Рисунок 3 – Изменение относительной амплитуды первой гармоники конвекционного тока ($\xi_1 = 2,8$)

Для учёта структуры неоднородного высокочастотного поля в исходных данных задаётся нормированное распределение СВЧ потенциала в первом ПВ при заданном радиусе, полученное по программе расчёта поля и параметров резонаторов. Это распределение используется в качестве граничного условия при расчёте СВЧ поля в ПВ генератора. Электронный КПД определялся как по амплитуде первой гармоники наведённого тока, так и по изменению кинетической энергии электронов.

В процессе компьютерного моделирования при изменении геометрических размеров пространства взаимодействия необходимо определять все размеры резонатора, его интегральные параметры, распределение напряжённости электрического поля и соотношение амплитуд СВЧ напряжений на зазорах. Это обстоятельство затрудняет и делает весьма трудоёмким процесс

определения оптимального режима работы генератора.

Анализ электронных процессов осуществляется в несколько этапов.

Сначала моделируется резонатор с размерами зазоров d_1 , d_2 и трубы дрейфа l_r , полученными в результате предварительного расчета из соотношений (1) – (3). В процессе моделирования подбирается размер выступа h для получения необходимого соотношения амплитуд СВЧ напряжений $U_{m1}/U_{m2} = 2,2 - 2,4$ и радиуса R оболочки резонатора, обеспечивающего заданную длину волны, и определяется распределение напряженности электрического поля в первом ПВ и соответствующее распределение СВЧ потенциала в этом пространстве, которое используется в дальнейшем в качестве граничного условия для расчёта внешних полей при анализе электронных процессов. С этими данными определяется оптимальный по максимуму КПД режим работы генератора – параметры γ , ξ_1 , ξ_2 . В используемой при моделировании программе предусмотрена также возможность изменения размеров l_{12} и d_2 без учета изменения распределения потенциала.

На следующем этапе проводится моделирование резонатора с новыми значениями l_{12} и d_2 . Уточняется длина h , обеспечивающая соотношение амплитуд напряжений на зазорах, полученное на предыдущем этапе. Это соотношение зависит только от геометрии резонатора и остаётся постоянным при анализе электронных процессов. Одновременно определяется новое распределение потенциала в ПВ. С новыми данными – распределением потенциала и геометрией ПВ – уточняется оптимальный режим работы генератора. В результате повторения описанных процедур последовательными приближениями достигается максимальный электронный КПД. Если ЭОС имеет многорядное расположение электронных лучей, то все расчеты проводятся сначала для лучей, расположенных на внешней окружности, затем для внутренних лучей с последующим усреднением КПД. Такая необходимость возникает на коротких волнах при большом относительном диаметре пролётных труб D/λ .

Ниже приведены результаты моделирования многолучевого генератора на длину волны $\lambda = 12,24$ см с ускоряющим напряжением $U_0 = 20 \pm 1$ кВ, первансом одного луча $p = 0,35$ мкА/В^{3/2}, полученные с использованием описанной методики. Длины зазоров оставались неизменными: $d_1 = 40$ мм, $d_2 = 6$ мм. Изменение приведённых размеров ПВ осуществляется в

программе изменением постоянной γ , то есть ускоряющего напряжения. Исследованы зависимости электронных КПД зазоров η_1 , η_2 и общего КПД генератора η_Σ от относительной амплитуды СВЧ напряжения ξ_1 для двух значений приведённой длины $\gamma d_1 = 7,48$ рад и $7,36$ рад, которым соответствуют разные значения КПД первого ПВ. Приведённая длина пролётной трубы равнялась соответственно $2,34$ рад и $2,3$ рад. Амплитуды напряжения на втором зазоре ξ_2 определялись из соотношения $\xi_1/\xi_2 = 2,33$.

Максимальная величина электронного КПД η_Σ в обоих вариантах близка к 57 % при относительных амплитудах $\xi_1 = 2,8$, $\xi_2 = 1,2$. Результаты расчёта КПД при этих амплитудах напряжения для $\gamma d_1 = 7,36$ рад и $\gamma d_2 = 1,1$ рад в зависимости от приведённого расстояния между центрами зазоров γl_{12} приведены на рисунке 4.

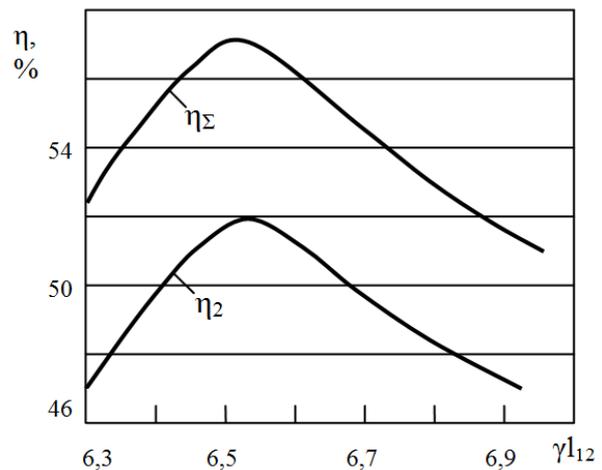


Рисунок 4 – Зависимости КПД от приведенного расстояния между центрами зазоров ($\eta_1 = 4,95$ %; $\xi_1 = 2,8$; $\xi_2 = 1,2$)

Максимальный КПД достигается при $\gamma l_{12} = 6,53$ рад, то есть меньшем, чем $2,5\pi$, что объясняется соответствующим уменьшением величины γd_1 в связи с увеличением времени пролёта электронов в первом ПВ из-за влияния пространственного заряда. В подтверждение этого вывода на рисунке 5 показаны зависимости η_1 , η_2 и η_Σ от приведённой длины ПВ γd_1 . Из рисунка следует, что с увеличением γd_1 увеличивается η_2 , так как увеличивается амплитуда первой гармоники конвекционного тока, но η_1 уменьшается из-за уменьшения (по абсолютной величине) отрицательной активной электронной проводимости первого ПВ. При $\gamma d_1 > 2,37\pi$ (то есть на $0,4\pi$ меньше верхней границы области отрицательной электронной проводимости мотрона, определенной без учета пространственного заряда в малосигнальном приближении) η_1 становится отрицательным. Соответственно

сначала уменьшается, а затем становится отрицательным вклад первого ПВ в общий КПД, что приводит к снижению электронного КПД генератора.

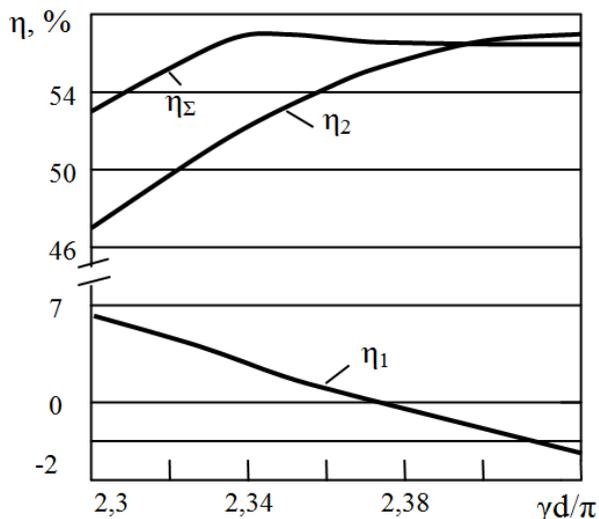


Рисунок 5 – Зависимости КПД η от приведенной длины первого ПВ

Оценим величину полного КПД генератора с учётом контурного КПД, используя формулу (5), приведённую в [5]. В оптимальном режиме $U_0 = 20$ кВ, первеанс при двухрядном расположении лучей $p = 6,3 \cdot 10^{-6}$ А/В^{3/2}, собственная добротность резонатора принята равной $Q_0 = 2000$, расчётное характеристическое сопротивление $\rho = 230$ Ом. В результате получен полный КПД, равный 55 %, то есть больше, чем КПД известных двухзоровых генераторов, в 2 раза.

Заключение

На основе численного моделирования исследован генератор с двухзоровым резонатором на синфазном виде колебаний, отличающийся от известных приборов протяженным простран-

вом взаимодействия первого зазора. При этом получены следующие результаты.

Протяжённое ПВ с углом пролёта, большим $2,4\pi$, является эффективным группирователем электронов и позволяет при больших амплитудах СВЧ напряжения получить амплитуду первой гармоники конвекционного тока более $1,5 I_0$. Показана возможность получения необходимого для оптимального режима работы генератора соотношения СВЧ напряжений на зазорах резонатора при высоких значениях характеристического сопротивления. Сочетание эффективного группирования с дополнительным отбором мощности от электронов в первом ПВ за счёт монотронного эффекта позволяет создать простой по конструкции генератор [6] с электронным КПД около 57 % и КПД по мощности в нагрузку 55 %. Такой генератор может быть использован как эффективный источник большой мощности СВЧ.

Библиографический список

1. Шевчик В. Н. Основы электроники сверхвысоких частот. – М.: Сов. радио, 1959. – С. 173.
2. Березин В. М., Буряк В. С. Электронные приборы СВЧ. – М.: Высшая школа, 1985. – С. 48.
3. Царёв В. А., Мучкаев В. Ю., Шалаев П. Д. Исследование многолучевого микроволнового генератора пролётного типа К-диапазона с электродинамической системой из двух связанных через щель резонаторов// Письма в ЖТФ. 2014. Т. 30, Вып. 7.
4. Chodorow M., Fan S. A floating drift – tube klystron// Proc. IRE, 1953, P. 25.
5. Глебова Т. А., Шишков А. А., Юркин В. И. Монотроны с неравномерным СВЧ полем// Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. № 53. С. 160-164.
6. Шишков А. А., Юркин В. И. Электровакуумный прибор СВЧ// Патент РФ № 2573597. Зарегистрирован 21.12.2015. Заявлен 18.09.2014 г.

UDC 621.385.624

DOUBLE GAP CAVITY OSCILLATOR WITH MONOTRON EFFECT IN THE FIRST INTERACTION SPACE

T. A. Glebova, PhD (physical and mathematical sciences), associate professor, RSREU, Ryazan; tatglebova@yandex.ru

A. A. Shishkov, PhD (technical sciences), associate professor, RSREU, Ryazan; tatglebova@yandex.ru

V. I. Yurkin, PhD (technical sciences), associate professor, RSREU, Ryazan; yurkin_vi@inbox.ru

SHF generator having one double-gap resonator which works in the mode of in-phase oscillation with monotrone effect in the first interaction space has been considered. This interaction space is extended and has the transit angle more than $2,4\pi$. It serves as an efficient electron buncher, which enables to receive the relative amplitude of convection current of first harmonic more than 1,5. Supplementary factor of device efficiency increase is the energy removed from the electron flow due to the monotrone effect in this interaction space. Conditions of efficient operating support have been discussed. A method to receive appropriate gap voltage amplitude ratio under high resonator characteristic impedance has been proposed. Numerical computations and analysis of electronic processes have been carried out, and availability of power efficiency coefficient about 55 % has been shown.

Key words: generator, double-gap resonator, in-phase oscillation mode, monotrone effect, extended interaction space, large voltage amplitude, efficiency coefficient.

DOI: 10.21667/1995-4565-2016-57-3-151-156

References

1. **Shevchic V. N.** Osnovy elektroniki sverhvysokih chastot, Moscow, Sovetskoye Radio, 1959, 173 p. (in Russian).

2. **Berezin V. M., Buryak V. S.** Electronnye pribory SVC, Moscow, Vysshaya shkola, 1985, 296 p. (in Russian).

3. **Tzarev V. A., Muchkaev V. Y., Shalaev P. D.** Issledovanie mnogoluchevogo mikrovolnovogo generatora proletnogo tipa K-diapazona s electrodinamicheskoi

sistemoi iz dvuh svyazannyh cherez schel rezonatorov. Pisma v ZTF. 2014, v. 30, no. 7, pp. 56-61 (in Russian).

4. **Chodorow M., Fan S.** A floating drift – tube klystron. Proc. IRE, 1953. - p. 25.

5. **Glebova T. A., Shishkov A. A. Yurkin V. I.** Monotrony s neravnomernym SVC polem. Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta. 2016, no. 53, pp. 160-164 (in Russian).

6. **Shishkov A. A. Yurkin V. I.** Electrovacuumniy pribor SVC Patent RF №2573597. Zaregistririvan 21.12.2015. Zajavlen 18.09.2014 г. (in Russian).