

ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ УСИЛИТЕЛЯ М-ТИПА С КАТОДНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Грицунов А.В.* , Козорезов Г.Г.** , Туренко Л.Ю.*

*Харьковский национальный университет радиозлектроники

пр. Ленина 14, Харьков, 61166, Украина

Тел.: (0572) 409362; e-mail: gritsunov@kture.kharkov.ua

** НП ОАО "Фаза", ул. Белорусская 9, Ростов-на-Дону, 344065, Россия

Аннотация – Проанализированы причины ограничения коэффициента усиления усилителей М-типа с катодным возбуждением (в частности, двухрядных амплитронов). Установлено, что одной из них является переход электронного потока под преимущественное управление со стороны ВЧ-поля анодной замедляющей системы. Для устранения этого недостатка предложены конструкции двухрядного усилителя М-типа с одной и двумя торцевыми областями группировки, в которых присутствует только катодная замедляющая система. Это создает условия для группирования электронного потока под действием входного сигнала без влияния ВЧ-поля анодной замедляющей системы.

I. Введение

Главным недостатком усилителей М-типа является незначительный коэффициент усиления, для амплитронов обычно не превышающий 15 ... 20 дБ. Он приводит к тому, что в последние годы эти приборы неуклонно сдают свои позиции многолучевым клистроном [1]. В качестве одного из методов повышения усиления усилителей со скрещенными полями сравнительно давно предложено использовать для возбуждения прибора замедляющую систему (ЗС), расположенную на отрицательном электроде (т.н. усилители с катодным возбуждением или двухрядные приборы) [2]. Основными факторами при этом, как предполагалось, должны являться электродинамическая развязка входа и выхода, а также нахождение возбуждающей катодной ЗС (КЗС) в непосредственной близости от электронной втулки.

Проведенные в начале 1980-х годов экспериментальные исследования двухрядных амплитронов [3] показали, что такие приборы действительно обладают несколько большим коэффициентом усиления по сравнению с обычными (до 22 дБ в полосе частот 6 ... 8 % для мегаваттного прибора), однако это значение все же слишком далеко от ожидаемого (порядка 30 ... 40 дБ). В то же время имеются сведения о создании за рубежом подобных приборов с коэффициентом усиления 23 ... 30 дБ в полосе частот до 12 % и низким уровнем шума [4].

Сразу же после описанных экспериментальных исследований был выполнен теоретический анализ причин такого несоответствия. Он показал, что, помимо разницы в угловой дрейфовой скорости электронов вблизи КЗС и анодной ЗС (АЗС) вследствие цилиндричности прибора и влияния объемного заряда [3], еще одним фактором может быть переход большей части электронного потока под преимущественное управление со стороны ВЧ-поля АЗС [5]. Поскольку обе системы расположены одна над другой, при большом коэффициенте усиления прибора амплитуда анодной волны в области втулки может быть сопоставимой или превышать амплитуду ВЧ-поля входного сигнала. Тем самым, даже без учета электродинамической связи обеих ЗС, реализуется механизм самовозбуждения паразитных видов колебаний в приборе обратной волны.

На основе данных исследований в 1986 г. были предложены конструкции усилителя с катодным возбуждением, в которых предусмотрены одна или две торцевые области группировки, где присутствует в основном ВЧ-поле КЗС, а воздействие поля АЗС ослаблено. Это дает возможность электронному потоку беспрепятственно сгруппироваться синхронно с волной входного сигнала. Сформированные сгустки, смещаясь вдоль оси прибора, поступают в пространство взаимодействия, где наводят сигнал в АЗС, как в обычном двухрядном усилителе.

II. Основная часть

Несмотря на разнообразие конструкций усилителей М-типа, наибольшее распространение на практике получили амплитроны. Это связано с тем, что незначительная азимутальная длина области дрейфа в них не создает условий для сколь-нибудь существенной разгруппировки спицы и обеспечивает тем самым высокий КПД прибора. Амплитроны с катодным возбуждением (см., например, [6]) сохраняют данное преимущество, хотя и не в полной мере. Это объясняется тем, что отсутствие сигнала на входе АЗС как бы удлиняет область дрейфа в азимутальном направлении, поскольку амплитуда волны в первой ячейке анодной системы теперь равна нулю. Данный недостаток можно нейтрализовать путем подачи части входного сигнала на вход АЗС, как это описано в [4].

Более существенной является следующая проблема. В известных конструкциях двухрядных амплитронов вся поверхность КЗС находится в ВЧ-поле наведенной в АЗС электронным потоком волны, которое, хотя и убывает при удалении от анода, но не уменьшается до нуля даже вблизи катода. Помимо создания нежелательной электродинамической связи между выходом и входом усилителя, при попытке достичь больших значений коэффициента усиления данное явление может привести к потере управления электронным потоком со стороны входного сигнала. Действительно, весь объемный заряд в приборе находится под одновременным воздействием двух составляющих ВЧ-поля: волны входного сигнала в КЗС и волны, наводимой самим потоком в АЗС. Как известно, электронное облако является нелинейной системой, которая обладает свойством перестраивать свою конфигурацию в соответствии со структурой ВЧ-поля доминирующей в данном месте электромагнитной волны. Это приводит, в частности, к подавлению слабого сигнала сильным при двухчастотном взаимодействии в амплитроне [7]. Если в области электронной втулки амплитуда ВЧ-поля наведенной в АЗС волны начинает превышать амплитуду поля волны в КЗС от внешнего источника, механизм электронной сортировки полем входного сигнала постепенно подавляется механизмом фазовой фокусировки полем наведенной волны. Тем самым создаются условия для прекращения синхронизации электронного потока входным сиг-

налом и возбуждения паразитных видов колебаний (например, карматронного).

Оценить коэффициент усиления K_{\max} , при котором возникает это явление, можно с учетом общеизвестных зависимостей радиального распределения амплитуды ВЧ-поля в цилиндрической системе. Предполагая азимутальное распределение амплитуды наведенной в АЗС волны линейным, и усредняя его вдоль периметра прибора, получаем:

$$K_{\max} = 20 \lg \left\{ \left(\frac{r_c}{r_a} \right)^{\gamma+1} \left[1 + \left(\frac{r_a}{r_c} \right)^{2\gamma} \right] \right\}, \text{ dB.} \quad (1)$$

Здесь r_c и r_a – радиусы катода и анода соответственно; γ – число спиц. Например, для указанного во введении прибора [3] $r_c = 9$ мм, $r_a = 16,2$ мм, $\gamma = 5$, следовательно, K_{\max} равен 20,4 дБ.

Из вышесказанного следует, что одним из путей повышения коэффициента усиления усилителя с катодным возбуждением является создание в нем области группировки, в которой присутствует только ВЧ-поле входного сигнала, а поле анодной волны ослаблено. Необходимо также предусмотреть механизм поступления сгруппированных электронных сгустков в область взаимодействия, где они могли бы наводить в АЗС составляющую электромагнитного поля, синхронную с полем волны входного сигнала в КЗС.

Теоретически возможно три вида пространственного разделения областей группировки и взаимодействия: радиальное, азимутальное и аксиальное. Признаки первого имеются в патенте [8], где между КЗС и АЗС введена дополнительная электродинамическая система, обеспечивающая экранирование прикатодной области от ВЧ-поля волны в АЗС. Эта конструкция малопримлема для мощных приборов ввиду плохого теплоотвода от промежуточной ЗС.

В патенте [9] предложен разнос областей группировки и взаимодействия в направлении дрейфа электронного потока. Поскольку для амплитрона это азимутальное направление, введение области, свободной от ВЧ-поля АЗС, приведет к существенной разгруппировке спиц, превратив прибор в разновидность усилителя с пространством дрейфа (SFD). Это также недопустимо ввиду снижения КПД. Следовательно, для амплитрона единственно приемлемым вариантом является аксиальный разнос пространств группировки и взаимодействия.

Данное решение заключается в размещении возле одного или обоих торцов области взаимодействия, в которой присутствуют только АЗС и гладкий катод, одной или двух областей группировки, в которых, наоборот, имеется только КЗС, а анод выполнен сплошным. Тем самым достигается пространственное разделение двух вышеуказанных областей, что приводит к дополнительному ослаблению вблизи поверхности КЗС электромагнитного поля наводимой в АЗС волны. Это снижает его воздействие на процесс электронной сортировки возле катода, позволяя сгруппироваться сгусткам, движущимся синхронно с волной входного сигнала в КЗС. Образовавшиеся сгустки дрейфуют затем в осевом направлении, поступая в область взаимодействия, где наводят в АЗС соответствующую составляющую ВЧ-поля.

На рис. 1 и 2 схематически изображены конструкции амплитрона с одной и двумя торцевыми областями группировки соответственно. Для наглядности внешний вид катодных узлов показан отдельно. При-

бор с одной областью группировки содержит КЗС, состоящую из сегментов 1 со вторично-эмиссионным покрытием 2. Часть сегментов составляет внешний проводник 3 коаксиальной линии 4, через которую подается входной сигнал. Имеется также участок сплошного катода 5 со вторично-эмиссионным покрытием 6. Положение закорачивающей перегородки 7 определяется условиями оптимального согласования КЗС с подводящей коаксиальной линией. Торцевые экраны 8 предотвращают утечку электронов за пределы областей группировки 9 и взаимодействия 10. Участок гладкого анода 11 расположен напротив сегментов КЗС. АЗС 12 находится напротив участка сплошного катода. Проточка 13 в гладком аноде снижает его шунтирующее действие на электромагнитное поле АЗС.

Усилитель с двумя областями группировки имеет две КЗС, состоящие из сегментов 1 со вторично-эмиссионным покрытием 2. Как и прежде, часть сегментов обеих систем образуют внешний проводник 3 подводящей коаксиальной линии 4. Между двумя КЗС расположен участок сплошного катода 5, имеющий вторично-эмиссионное покрытие 6. Перегородка 7 служит для согласования обеих ЗС с коаксиальной линией. Торцевые экраны 8 ограничивают с одной стороны области группировки 9. Вторая сторона последних граничит с областью взаимодействия 10. Два участка гладкого анода 11 расположены против сегментов соответствующих КЗС. АЗС 12 находится напротив участка сплошного катода. Проточки 13, как и ранее, снижают шунтирующее действие участков гладкого анода на электромагнитное поле АЗС.

Обе конструкции прибора работают следующим образом. Входной сигнал (на обоих рисунках он подается слева) инициирует на сегментах КЗС размножение вторичных электронов, что обеспечивает развитие в этом месте электронной втулки. За счет электронной сортировки в поле электромагнитной волны входного сигнала, распространяющейся в КЗС, эмитированные катодом электроны группируются в сгустки. В области группировки поле электромагнитной волны, распространяющейся в АЗС, ослаблено. По-

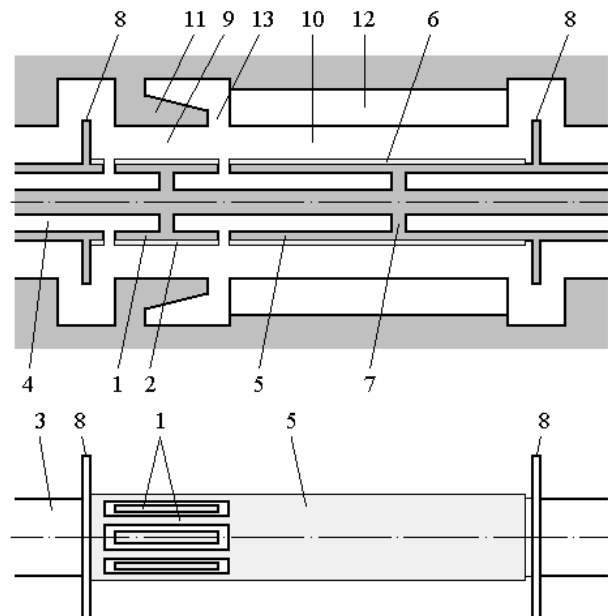


Рис. 1. Амплитрон с одной областью группировки

Fig. 1. Amplitron with one bunching space

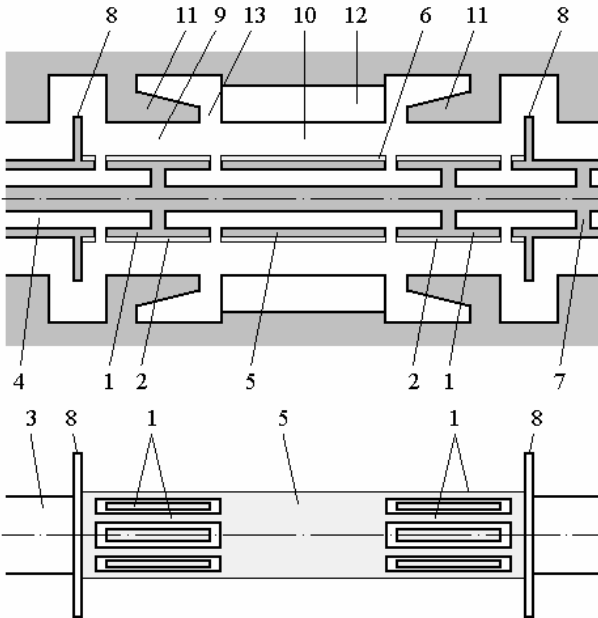


Рис. 2. Амплитрон с двумя областями группировки

Fig. 2. Amplitron with two bunching spaces

этому сгустки здесь движутся синхронно с волной в КЗС. Влияние расталкивающих сил объемного заряда втулки, а также наличие радиальной составляющей статического магнитного поля, неизбежной в магнитных системах приборов М-типа, приводит к тому, что сгустки смещаются в осевом направлении из области (областей) группировки в пространство взаимодействия. Здесь они осуществляют вторично-эмиссионный запуск катода и наводят в АЗС электромагнитную волну, синхронную с волной входного сигнала в КЗС. При необходимости процесс осевого дрейфа сгустков можно интенсифицировать созданием небольшой аксиальной составляющей статического электрического поля, например путем конусообразного выполнения части поверхностей катода и анода.

Повышению коэффициента усиления в рассмотренных конструкциях усилителя М-типа способствует как увеличение электродинамической развязки между входом и выходом, так и то, что в АЗС постоянно сохраняется составляющая электромагнитного поля, синхронная по частоте с полем входного сигнала в КЗС. Она наводится сгустками, движущимися вблизи границы областей группировки и взаимодействия.

Проверка эффективности предложенных технических решений возможна экспериментальным путем, а также с помощью численного моделирования. В последнем случае необходима полная трехмерная модель усилителя М-типа. Пока проведено лишь раздельное моделирование областей группировки и взаимодействия с помощью двумерных моделей.

Повторные расчеты с использованием современных алгоритмов макрочастиц в основном подтвердили результаты исследований [5, 10, 11] о существовании даже при малой мощности входного сигнала конечно-диапазона анодных напряжений, для которых наблюдается синхронизм сгустков в области группировки (рис. 3) с ВЧ-волной входного сигнала в КЗС. Однако механизм электронной сортировки здесь часто нарушается в результате возникновения различных паразитных группировок электронного потока, включая его собственные колебания, вторично-эмиссионные сгустки и истинные солитоны.

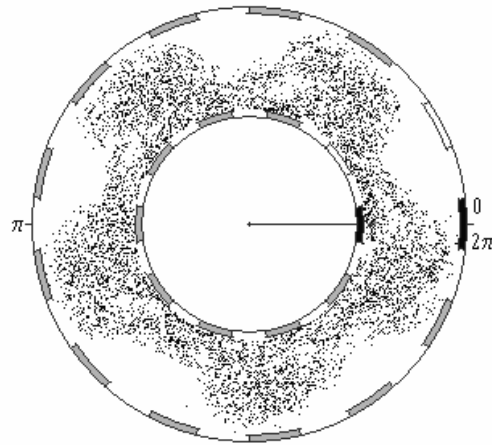


Рис. 3. Сгустки в области группировки

Fig. 3. The bunches in bunching space

III. Заключение

Предложенное усовершенствование конструкции двухрядного усилителя М-типа ориентировано, в первую очередь, на амплитроны, поскольку у этих приборов пространство дрейфа не может быть расширено в азимутальном направлении. Тем не менее, идея пространственного разделения областей группировки и взаимодействия в направлениях, перпендикулярных направлению дрейфа электронного потока, может быть полезной и для других приборов.

IV. Список литературы

- [1] Гельвич Э.А., Жарый Е.В., Закурдаев А.Д., Пугнин В.И. Многолучевые клистроны. Тенденции развития. – В кн.: Современные проблемы электроники и радиофизики СВЧ. Материалы конференции [Саратов, март 2001 г.]. Саратов: ГосУНЦ «Колледж», 2001.
- [2] Цейтлин М.Б., Фурсаев М.А., Бецкий О.В. Сверхвысокочастотные усилители со скрещенными полями. – М.: Сов. радио, 1978.
- [3] Десярев А.И., Козорезов Г.Г., Михалевский В.С. Экспериментальные исследования двухрядного амплитрона. – В кн.: X Всес. науч. конф. "Электроника СВЧ". Материалы конференции [Минск, сентябрь 1983 г.]. Т. 1. Минск: МРТИ, 1983.
- [4] Cathode-driven crossed-field amplifier. – Microwave J., 1988, v. 31, No. 2, p. 208.
- [5] Грицунов А.В. Исследование амплитронов с катодным возбуждением методом численного эксперимента. – В кн.: XI Всес. науч. конф. "Электроника СВЧ". Материалы конференции [Орджоникидзе, сентябрь 1986 г.]. Т. 1. Орджоникидзе: СКНЦВШ, 1986.
- [6] Kaisal S.F. Microwave tube technology review. – Microwave J., 1977, v. 20, No. 7, p. 23.
- [7] Skowron J.F. The continuous-cathode (emitting-sole) crossed-field amplifier. – Proc. IEEE, 1973, v. 61, No. 3, p. 330.
- [8] Dudley et al. Multi-resonator microwave oscillator. – US Pat. No. 3 980 920. Sept. 14, 1976.
- [9] McDowell, Hunter Lee. Cathode driven crossed-field amplifier. – European Pat. No. 0 133 771. March 6, 1985.
- [10] Грицунов А.В., Галаган А.В. О группировке электронного потока в скрещенных полях. – В кн.: Всес. науч.-техн. конф. "Электронное приборостроение". Материалы конференции [Новосибирск, апрель 1988 г.]. Новосибирск: НЭТИ, 1988.
- [11] Грицунов А.В. Об особенности группировки электронного потока в скрещенных полях. – В кн.: Всес. науч.-техн. конф. "Актуальные проблемы электронного приборостроения". Материалы конференции [Новосибирск, апрель 1990 г.]. Новосибирск: НЭТИ, 1990.

A CATHODE-DRIVEN CFA GAIN INCREASE

Gritsunov A.V.^{*}, Kozorezov G.G.^{**}, Turenko L.Y.^{*}

^{*}Kharkiv National University of Radio Electronics,
14, Lenin Ave., Kharkiv, 61166, Ukraine

phone: (0572) 409362

e-mail: [gritunov@kture.kharkov.ua](mailto:gritsunov@kture.kharkov.ua)

^{**}Joint-Stock Company "Faza",

9, Byelorusskaya Str., Rostov-on-Don, 344065, Russia

Abstract – The causes of cathode-driven CFA's (in particular, double-row amplatron) gain restriction are analyzed. It is ascertained that one of these is predominant electron stream control by RF field of the anode delay line while cathode input signal is disregarded. To reduce this drawback, double-row CFA's constructions are proposed with one or two axially shifted bunching spaces, which contain cathode delay line only. Thus condition for electron stream bunching under the input signal without disturbance from anode structure RF field is ensured.

I. Introduction

A low gain of CFA's is their principal disadvantage, which restricts the area of those applications comparing with multi-beam klystrons. The cathode-driven (or double-row) CFA's [6] were created to overcome this imperfection. The main factors, as it was expected, are electrodynamic isolation of tube input and output as well as placing of driving signal electromagnetic field in immediate proximity to the electron hub.

The experimental results for double-row CFA's (mainly, amplitrons) are rather far from desired ones. The largest gain was achieved about 23 dB with a 12 percent bandwidth [4]. The causes of this inadequacy had been ascertaining by means of computer simulation. Main ones, to all appearance, are difference of electron stream drift angular velocity nearby cathode and anode delay lines due to tube cylindrical geometry and space charge influence as well as lack of electron cloud control by input signal. Despite a delay line RF field attenuation with distance, under large gain factor the anode structure field may exceed the cathode line one in whole interaction space. Thus the condition of backward-wave tube self-excitation may be created even without the lines electrodynamic coupling.

As a result of these investigations, the new constructions of cathode-driven CFA's were proposed in 1986, with one or two bunching spaces, which are separated from the interaction space in axial direction. The bunching space contains only cathode delay line and smooth anode. On the contrary, the interaction space holds only anode slow-wave structure and smooth cathode. Inasmuch as RF field of anode line not penetrates into bunching area, the electron stream may bunch here only under the influence of input signal. A bunches slowly drift along the tube axis reaching the interaction space, where they induce RF signal in anode delay structure, like to conventional cathode-driven CFA.

II. Main part

A main advantage of amplatron in comparison with other CFA's is its high efficiency, which is achieved due to small azimuthal length of drift space. The cathode-driven amplatron not quite retains this virtue because of driving signal absence at input end of anode delay line. That defect may be reduced by redirection of part of input signal to the anode structure, as it is described in [4].

Other imperfection of known double-row CFA's is more substantial. Owing to placing of the cathode and anode delay lines facing one another, the anode RF field not decreases to zero even nearby the cathode surface. As a result, unwanted electrodynamic coupling of tube input and output is created. Moreover, if gain factor is too large, all space charge in tube comes over to predominant influence of anode line RF field. Due to a nonlinear electron-wave interaction, the suppression of weak signal by strong one has a place [7]. Therefore synchronization of electron stream by driving signal may be replaced with spurious operation modes, like to a carmatron-type one.

The rough estimation of highest gain factor K_{\max} which is limited by latter phenomenon may be performed under formula

(1), where r_c and r_a are the cathode and anode radiuses respectively; γ is a number of spokes.

It is clear from abovementioned that one of cathode-driven CFA gain increase method is spatial separation of electron stream bunching process (electron sorting) and energy extraction one (phase focusing). It is necessary also creating condition for transition of modulated electron cloud from the former zone to the latter one.

There are only three kinds of space separation: in radial, azimuthal and axial directions. The former is described in patent [8]. That is ill suitable for power devices because of bad heat removing from intermediate RF line. Proposed in patent [9] separation of bunching and interaction spaces along the electron beam drift direction is useless for an amplatron, because drift space expansion (like to a SFD) results in tube efficiency reduction. Therefore only useful solution is axial displacement of the spaces. It may be realized by means of addition to one or two axial ends of interaction space the bunching spaces, where only cathode delay line is present, while anode is smooth. The RF field of placed in interaction space anode structure very weakly penetrates into bunching spaces, therefore that cannot interferes the electron sorting process here. On the contrary, bunched here electron clots can move to interaction space and control the tube output signal.

Figs. 1 and 2 show the amplatron sections with one and two bunching areas respectively. The cathode assemblies are shown separately. In both cases the cathode delay line(s) consists of segments 1 with secondary-emission layer 2. A part of the segments forms the outer cylinder 3 of input coaxial line 4. There is smooth cathode section 5 too, with secondary-emission layer 6. The short-circuiting diaphragm 7 provides best input line matching. The end shields 8 prevent electrons escape from bunching 9 and interaction 10 spaces. The smooth anode section(s) 11 is (are) placed opposite cathode RF structure(s) segments. On the contrary, the anode delay line 12 is disposed opposite the smooth cathode section. The groove(s) 13 in solid anode(s) decreases shunting effect of that for the anode structure RF field.

The operation of both CFA's is similar. An input signal initiates the secondary-emission electron multiplication at cathode line(s) segments. The arisen electron hub(s) bunch then into clots due to electron sorting by input signal wave(s). Because of anode line RF field attenuation in bunching space(s), the clots rotate here synchronously with the cathode line(s) RF field. Space charge repulsion along with a static magnetic field small radial component influence results in slow axial drift of bunches toward the interaction space. They initiate secondary-emission electron multiplication here and induce synchronous with input signal electromagnetic wave component in anode RF structure. Bunches axial drift velocity may be increased, if it is necessary, with creation of small axial component of static electric field, e.g. by cathode and anode cone.

The gain increase for those systems is obtained as result of electrodynamic decoupling between cathode and anode delay lines as well as retaining of synchronous with input signal electromagnetic wave component in anode RF structure for any gain factor. The latter is provided by electron clots which are situated closely to bunching and interaction spaces interface.

The full 3D simulation of proposed CFA's in order to justify the technical suggestions validity was not performed yet. The modeling of separate bunching and interaction spaces using 2D particles algorithm confirms existing of anode voltage region in which synchronism of electron bunches (Fig. 3) with driving wave in bunching area is observed even for small input power. But mechanism of electron sorting is often disturbed here by various stream instabilities, like to plasma natural oscillations, secondary-emission bunching or true solitons.

III. Conclusion

The offered improvement of a double-row M-type amplifier construction is amplatron-oriented in the first place, because a drift space of that cannot be expanded in azimuthal direction. Nevertheless, the idea of bunching and interaction spaces spatial separation in directions, which are perpendicular to electron cloud streamline, may be also useful for other tubes.