

## ВОЗМОЖНЫЕ СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТЬЮ УСИЛИТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ НА БАЗЕ ПРИБОРОВ М-ТИПА

Андрей Дмитриевич Никитин<sup>1✉</sup>, Александр Сергеевич Ивлиев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-производственное предприятие «Исток» им. Шокина,  
Фрязино, Московская обл., Россия

<sup>2</sup>Радиотехнический институт им. академика А.Л. Минца, НПЦ-5,  
Саратов, Россия

<sup>1</sup>[a.nikitin.2018@mail.ru](mailto:a.nikitin.2018@mail.ru)✉

<sup>2</sup>[ivliev-aleksandr@mail.ru](mailto:ivliev-aleksandr@mail.ru)

*Аннотация.* Статья посвящена исследованиям эксплуатации усилителей М-типа в различных режимах управления выходной мощностью, для реализации возможности многорежимной работы передающих модулей радиолокационных станций (РЛС) с использованием электровакуумных приборов (ЭВП) М-типа. Необходимость таких исследований возникла с повышением требований к мощным передающим модулям. Представлены результаты исследований различных методов управления выходной мощностью амплитрона. Рассмотрен принципиально новый способ управления выходной мощностью усилителей М-типа – управление рабочим напряжением с изменением величины магнитной индукции. Показано, что использование

комбинированного метода управления выходной мощностью, совмещающего в себе управление входным сигналом, анодным током и управлением анодным напряжением позволит изменять выходную мощность усилителя в диапазоне более 11дБ.

**Ключевые слова:** мощные передающие модули, усилители М-типа, амплитрон, активная фазированная антенная решетка (АФАР), многорежимная работа РЛС

**Для цитирования:** Никитин А.Д., Ивлиев А.С. Возможные способы управления выходной мощностью усилительных модулей на базе приборов М-типа // Труды МАИ. 2022. № 122. DOI: [10.34759/trd-2022-122-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-14)

## POSSIBLE METHODS FOR CONTROLLING THE OUTPUT POWER OF AMPLIFIER MODULES BASED ON M-TYPE DEVICES

**Andrey D. Nikitin**<sup>1✉</sup>, **Alexander S. Ivliev**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research and production corporation "Istok" named after Shokin, Fryazino, Moscow region, Russia

<sup>2</sup>Radiotechnical Institute named after academician A.L. Mints, NPC-5, Saratov, Russia

<sup>1</sup>[a.nikitin.2018@mail.ru](mailto:a.nikitin.2018@mail.ru)<sup>✉</sup>

<sup>2</sup>[ivliev-aleksandr@mail.ru](mailto:ivliev-aleksandr@mail.ru)

**Abstract.** The article is devoted to the study of the operation of M-type amplifiers in various output power control modes, to realize the possibility of multi-mode operation of transmitting modules of radar stations (RLS) on active phased array antennas using M-type electrovacuum devices (EVD). The need for such studies arose with the increasing

requirements for powerful transmitting modules. The results of studies of various methods for controlling the output power of the amplatron are presented. A fundamentally new way to control the output power of M-type amplifiers is considered - control of the operating voltage with a change in the magnitude of the magnetic induction.

As a result of the studies carried out on the possibility of operating M-type amplifiers in the output power control mode, the following was revealed:

- when controlling the input signal, the range of output power variation is at least 1.0 dB;
- when controlling the anode current, the range of output power variation is at least 5.0 dB;
- when controlling the operating voltage, the range of output power variation is at least 5.2 dB.

The results obtained can be of great practical importance in the construction of powerful transmitting amplifying modules for multi-mode radars with active phased array antennas and passive phased antennas array. It is shown that the use of a combined method of output power control, which combines the control of the input signal, anode current and control of the anode voltage, will allow changing the output power of the amplifier in the range of more than 11 dB.

It was also shown that when controlling the input signal of the amplifier, it is possible to expand the operating frequency range of the amplifying module up to 10-12%.

**Keywords:** high-power transmitting modules, M-type amplifiers, amplatron, active phased array antenna (APAA), radar multi-mode operation

**For citation:** Nikitin A.D., Ivliev A.S. Possible ways to control the output power of amplifying modules based on M-type devices. *Trudy MAI*, 2022, no. 122. DOI: [10.34759/trd-2022-122-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-14)

## **Введение**

В настоящее время, развитие радиолокационной аппаратуры идет по пути расширения ее функциональных возможностей, что требует совершенствование передающих модулей и замены устаревших технических средств новыми.

Для обеспечения сопровождения большого числа скоростных целей требуется многорежимная радиолокационная система с расширенными функциональными возможностями по обнаружению и мониторингу [1-2]. Многорежимная работа передающего модуля должна включать в себя возможность использования режима с большой паузой между импульсами, для обнаружения целей на большой дальности. При этом необходимо располагать большой энергией в импульсе.

Таким образом, все основные параметры передающего модуля – выходная импульсная мощность, длительность импульса и частота их повторения, а также рабочая частота сигнала должны иметь возможность быстро и независимо друг от друга изменяться в широких пределах [3-5]. Это требует создания мощных передающих устройств, обеспечивающих возможность изменения длительности импульса в широких пределах при сохранении энергии в импульсе.

Известно, что малая величина импульсной выходной мощности у полупроводников (ПП) ограничивает возможности ее регулировки [6]. Наличие этого

«потолка» по мощности вынуждает разработчиков РЛС для обеспечения дальности обнаружения набирать нужную энергию в импульсе за счет увеличения длительности импульса. Это ведет к использованию режимов с низкой скважностью. Возможностей для обеспечения многорежимности практически не остается.

В отличие от ПП, электровакуумные приборы М-типа располагают большим запасом по импульсной мощности и, как правило, используются при скважности 1000.

Одним из перспективных направлений, в решении задачи создания эффективных передающих устройств, для мощных многорежимных РЛС, является создание твердотельно-вакуумных усилительных модулей, применяя в качестве выходного каскада амплитрон. Исследования электрических параметров амплитронов и схем построения усилительных модулей, проведенные в ОАО «Тантал» под руководством профессора Я. А. Старца, подтверждают их преимущества по выходной мощности и КПД перед твердотельными усилителями. [7-8].

Амплитроны применяются в качестве усилителей сравнительно мощных сигналов, коэффициент полезного действия (КПД) амплитронов достигает 85%. В непрерывном режиме амплитроны выдают выходную мощность до 500 кВт, а в импульсном — 10 МВт и даже больше. Относительная ширина полосы частот 5 — 10%. Анодное напряжение — единицы или десятки киловольт, а ток анода — десятки ампер [9-11].

Размеры, КПД, полоса рабочих частот, фазовая стабильность и эксплуатационные параметры, присущие процессу взаимодействия в скрещенных электромагнитных полях выгодно отличают усилитель М-типа от других приборов сверхвысокой частоты (СВЧ) [12]. В амплитроне принципиально не существует ограничения на выходную мощность. Практически она определяется эмиссионной способностью катода и допустимой мощностью, рассеиваемой на аноде. Это свойство приборов М-типа потенциально позволяет изменять выходную мощность прибора в достаточно широком диапазоне.

На сегодняшний день исследованиями возможностей эксплуатации усилительных модулей на базе приборов М-типа в различных режимах управления выходной мощностью практически не занимались. Хотя усилители на базе приборов М-типа – это широко известные СВЧ-устройства, многие процессы, лежащие в основе их работы, и потенциальные возможности изучены недостаточно. Одной из этих потенциальных возможностей является исследование управления выходной мощностью амплитрона в широком диапазоне, что позволит создавать передающую аппаратуру, обеспечивающую требования многорежимных РЛС.

## **2. Принципы управления выходной мощностью**

Как уже было отмечено ранее, усилители М-типа выгодно отличаются от других СВЧ приборов и нашли наиболее широкое применение в передающих модулях для радиолокационных станций, в качестве мощных оконечных устройств. Для обеспечения многорежимности все основные параметры передатчика – выходная импульсная мощность  $P_{имп}$  [13], длительность импульса, а также рабочая частота

сигнала должны иметь возможность быстро и независимо друг от друга изменяться в широких пределах.

При решении задачи управления выходной мощностью усилителей на базе приборов М-типа можно рассматривать следующие принципы управления выходной мощностью.

## 2.1 Управление входным сигналом

Начиная с порогового уровня мощности входного сигнала, выходная мощность растет при увеличении входного сигнала. Вначале существует линейная связь  $P_{\text{вых}}$  и  $P_{\text{вх}}$ . Наиболее явно это свойство приборов М-типа наблюдается на усилителях с пространством дрейфа – усилителях прямой волны М-типа. Затем наступает «излом» характеристики, и хотя  $P_{\text{вх}}$  растет, коэффициент усиления уменьшается – прибор переходит в режим насыщения.

Исследования профессора В.Н Макарова из Московского института радиотехники показывают, что все усилители М-типа в окрестности рабочих режимов работают при почти постоянном, недостижимом для других приборов, высоком КПД, даже при изменении входной и выходной мощностей в несколько раз [14]. Это уникальное свойство усилителей М-типа может быть использовано для обеспечения многорежимности РЛС.

Исследование возможности эксплуатации усилителей М-типа в режиме управления выходной мощностью управлением входным сигналом проводилось на импульсном амплитроне. Необходимо отметить, что все изменения входного и

выходного сигналов для исследуемого усилителя и для всех усилителей М-типа являются допустимыми при эксплуатации.

Для исследования возможности управления выходной мощностью при управлении входным сигналом, были произведены замеры электрических параметров амплитрона в рабочем диапазоне частот, граничные частоты  $f_1$  и  $f_2$  при следующих режимах работы:

- при постоянном значении магнитной индукции  $B=1500$  Гс;
- при фиксированном значении  $I_a=\text{const}$ ;
- скважность  $Q=\text{const}$ ;
- длительность импульса  $\tau=\text{const}$ ;
- ток накала  $I_H=\text{const}$ .

На рисунке 1 представлена зависимость выходной мощности амплитрона от величины входного сигнала на частоте  $f_1$ .



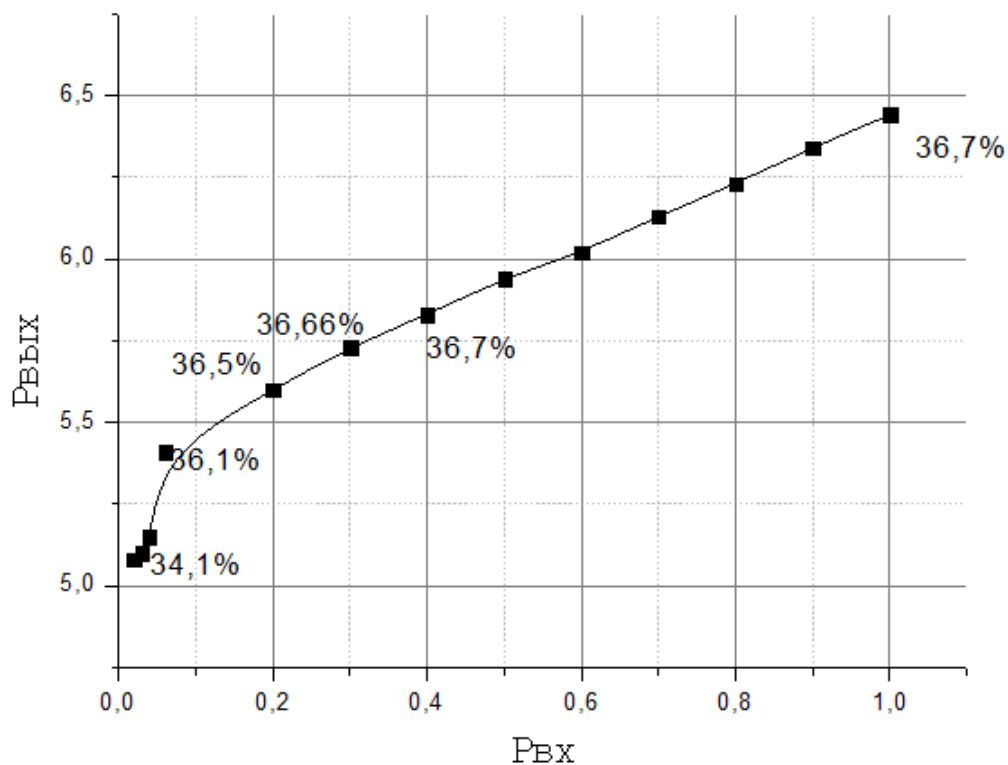


Рисунок 1 – зависимость выходной мощности от входной

Проанализировав полученные результаты, мы пришли к выводу, что амплитрон переходит в режим насыщения при  $P_{вх}=0,4$ кВт. Дальнейшее управление входным сигналом не дает существенной прибавки выходной мощности и происходит с уменьшением коэффициента усиления и без увеличения КПД. На частоте  $f_1$  диапазон изменения выходной мощности амплитрона возможен в пределах от 5,08 кВт до 5,83 кВт или в диапазоне 0,6 дБ. На частоте  $f_2$  диапазон изменения выходной мощности амплитрона возможен в пределах от 4,0 кВт до 5,15 кВт или в диапазоне 1,0 дБ.

Исследования показали, что при управлении входным сигналом амплитрон устойчиво работает во всем диапазоне частот, без существенного изменения КПД и соответствует требованиям технических условий для данного прибора.

Таким образом, управление выходной мощностью входным сигналом возможно, однако диапазон управления в полосе рабочих частот составляет не более 1,0 дБ. Основным преимуществом исследуемого метода является возможность обеспечивать широкий рабочий диапазон частот (не менее 10-12%) [15], за счет возможности контролировать СВЧ сигналом с увеличенной амплитудой целостность втулки пространственного заряда.

С учетом развития многодиапазонных излучателей для фазированных антенных решеток [16] обеспечение широкого рабочего диапазона длин волн усилительных модулей является актуальной задачей, которую можно решить, применяя в качестве электронной компонентной базы (ЭКБ) приборы М-типа.

## 2.2 Управление анодным током

Приборы М-типа отличаются высокой стабильностью основных характеристик при изменении анодного тока в широких пределах. Начиная с порогового входного сигнала, выходная мощность растет при увеличении входного сигнала, затем наступает «излом» характеристики и, хотя  $P_{вх}$  растет, коэффициент усиления уменьшается – амплитрон переходит в режим насыщения [17-18]. Дальнейшее увеличение выходной мощности возможно при росте числа электронов (при увеличении тока пучка). Для увеличения выходной мощности и коэффициента усиления, при том же входном сигнале необходимо увеличение мощности источника питания  $P_0 = I_a * U_a$ .

Для исследования возможности управления выходной мощностью при изменении анодного тока были произведены замеры электрических параметров

амплитрона в рабочем диапазоне частот  $\Delta f$ , граничные частоты  $f_1$  и  $f_2$ . Значения всех параметров, выражены в относительных единицах по отношению к номинальной величине. Замер электрических параметров на граничной частоте  $f_1$  рабочего диапазона частот  $\Delta f$  производился в следующем режиме работы:

- величина индукции магнитного поля  $B=1700$  Гс;
- скважность  $Q=\text{const}$ ;
- длительность импульса  $\tau=\text{const}$ ;
- величина импульсной входной мощности  $P_{\text{вх}}=0,4$  кВт;
- ток накала  $I_{\text{н}}=\text{const}$ .

На рисунке 2 представлена вольтамперная характеристика (ВАХ) амплитрона на частоте  $f_1$ , из которой видно, что управление анодным током позволяет в широких пределах управлять выходной мощностью.

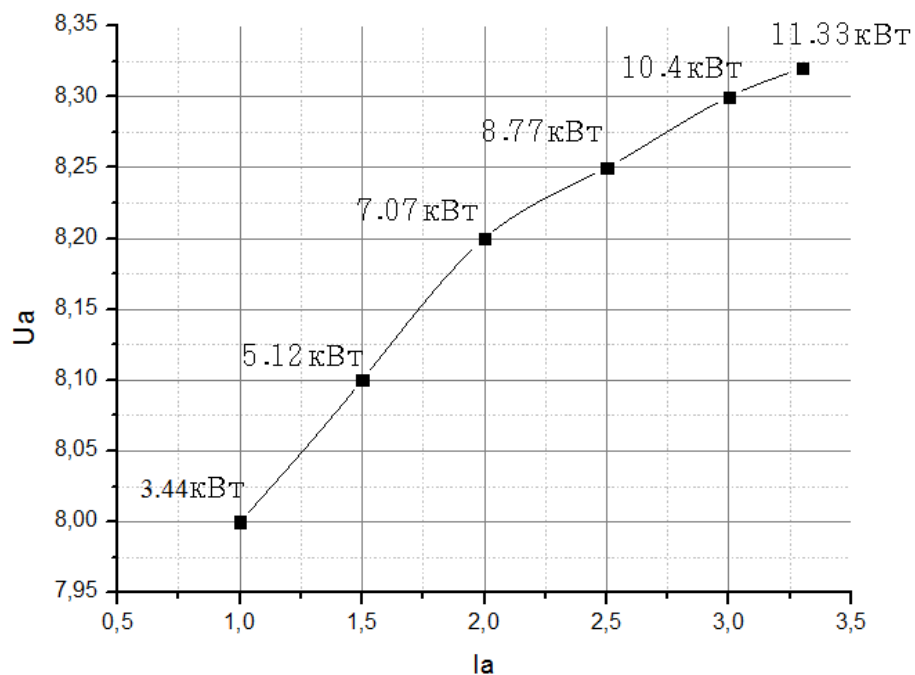


Рисунок 2 – вольтамперная характеристика амплитрона

В результате динамических испытаний импульсного амплитрона, было выявлено, что при увеличении анодного тока  $I_a > 3,4$  происходит срыв усиления. Амплитрон переходит в режим самовозбуждения. Срыв усиления происходит, при увеличении анодного тока до значения, при котором, входной сигнал не справляется с формированием электронных «спиц», происходит их распад, в результате амплитрон переходит из режима усиления в режим генерации.

Диапазон изменения мощности при исследуемом методе управления достигает 5,2 дБ на частоте  $f_1$  и 4,8 дБ на граничной частоте  $f_2$ . Исследуемый метод позволяет управлять выходной мощностью в более широком диапазоне, чем метод управления изменением мощности входного сигнала.

Следует также отметить возможность увеличения полосы усиления по току, при увеличении величины входной мощности. Указанная возможность будет подробно исследована далее.

### **1.3 Управление анодным напряжением**

Возможность управления выходной мощностью изменяя анодное напряжение применительно к электровакуумным приборам никогда не рассматривалась. Это связано с тем, что условия взаимодействия – условие синхронизма электронного потока и электромагнитной волны в вакуумном приборе определяется напряжением и жестко связано электродинамическими свойствами (геометрией) замедляющей системы. Однако условие синхронизма в приборах М-типа обеспечивается не анодным напряжением, а отношением анодного напряжения к величине магнитной

индукции [19]. Эта особенность приборов М-типа позволяет по-новому посмотреть на вопрос управления выходной мощностью электровакуумных приборов.

Так как анодное рабочее напряжение пропорционально индукции магнитного поля, то управление индукцией магнитного поля приведет к изменению подводимой мощности и, следовательно, при поддержании постоянным значение анодного тока, анодное напряжение будет изменяться пропорционально магнитной индукции.

В связи с вышесказанным электроны будут обладать большей потенциальной энергией, которая будет передаваться электромагнитной волне, распространяющейся по замедляющей системе. А, следовательно, будет изменяться и величина выходной мощности.

Для исследования возможности управления выходной мощностью анодным напряжением были произведены замеры электрических параметров при фиксированных частотах, длительности, скважности импульса и при значениях индукции магнитного поля:  $V_1=2300$  Гс,  $V_2=1700$  Гс,  $V_3=1500$  Гс. Входная мощность во всех замерах фиксирована:  $P_{вх}=1,0$  кВт.

Значения всех параметров, выражены в относительных единицах по отношению к номинальной величине.

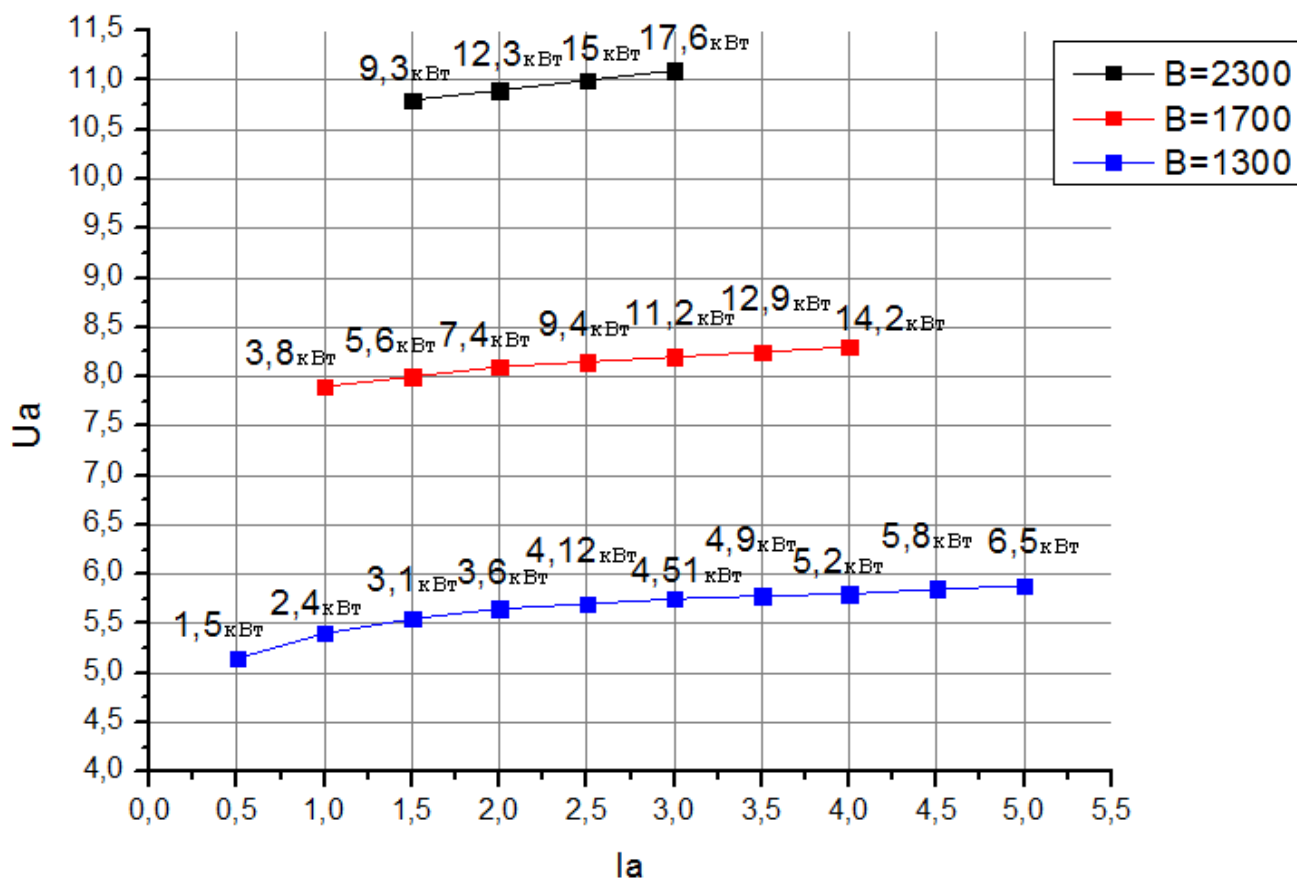


Рисунок 3 - семейство ВАХ при управлении рабочим напряжением

На рисунке 3 представлены ВАХ амплитрона при управлении рабочим напряжением, из которых видно, что управление выходной мощностью амплитрона при изменении рабочего напряжения возможно в диапазоне изменения выходной мощности от 1,37 кВт до 17,6 кВт или в диапазоне не менее 5,2 дБ при изменении величины магнитной индукции от  $B=1300$  Гс до  $B=2300$  Гс соответственно.

## 2.4 Комбинированный метод управления выходной мощностью

В усилителе М-типа на электрон действуют силы постоянного электрического и магнитного поля, а также электрического высокочастотного поля. На электроны действует сила со стороны пространственного заряда, образованного другими

электронами. Действие пространственного заряда выражается в уменьшении потенциалов, придании наклона «спицам» и образовании неупорядоченных электронных сгустков. Силы пространственного заряда стремятся вытолкнуть электроны из пространства взаимодействия в направлении, перпендикулярном плоскости, в которой лежат траектории электронов [20].

В связи с вышеизложенным, срыв усиления при увеличении тока (количества электронов) - это и есть следствие влияния силы пространственного заряда. В результате происходит неупорядоченное образование электронных сгустков и, как следствие, распад электронных «спиц». Происходит нарушение синхронизма взаимодействия электромагнитной волны с электронным потоком и прибор переходит из режима усиления, в режим генерации. Не допустить срыва усиления возможно формированием «спиц» при помощи увеличения величины входной мощности и в связи с этим появляется возможность увеличения анодного тока и тем самым расширение диапазона управления выходной мощности. Это станет возможным при использовании комбинированного метода управления входным сигналом и анодным током.

Использовать комбинированный метод управления входным сигналом и анодным током возможно в комплексе с управлением рабочим напряжением изменением индукции магнитного поля, с целью увеличения диапазона изменения выходной мощности. Для этого к результатам исследований управления выходной мощности при величине магнитной индукции  $B=2300\text{Гс}$  при входной мощности

$P_{вх1}=1,0$  кВт, дополнительно исследуем параметры амплитрона при том же режиме работы, но с увеличенной входной мощностью до  $P_{вх1}=1,3$  кВт.

Замер электрических параметров при входной мощности  $P_{вх1}=1,3$  кВт на граничной частоте  $f_1$  рабочего диапазона частот  $\Delta f$ , который производился в следующем режиме работы:

-величина индукции магнитного поля  $B=2300$ Гс;

-частота входного сигнала  $f_1=const$ ,

-скважность  $Q=const$ ;

-длительность импульса  $\tau=const$ ;

-величина импульсной входной мощности  $P_{вх1}=1,3$  кВт.

На рисунке 4 видно, что при увеличении входной мощности до  $P_{вх1}=1,3$  кВт, диапазон усиления, по анодному току составляет от 1,0 до 3,3 и изменение выходной мощности амплитрона возможно в пределах от 6,68 кВт до 20,4 кВт или 4,84 дБ.



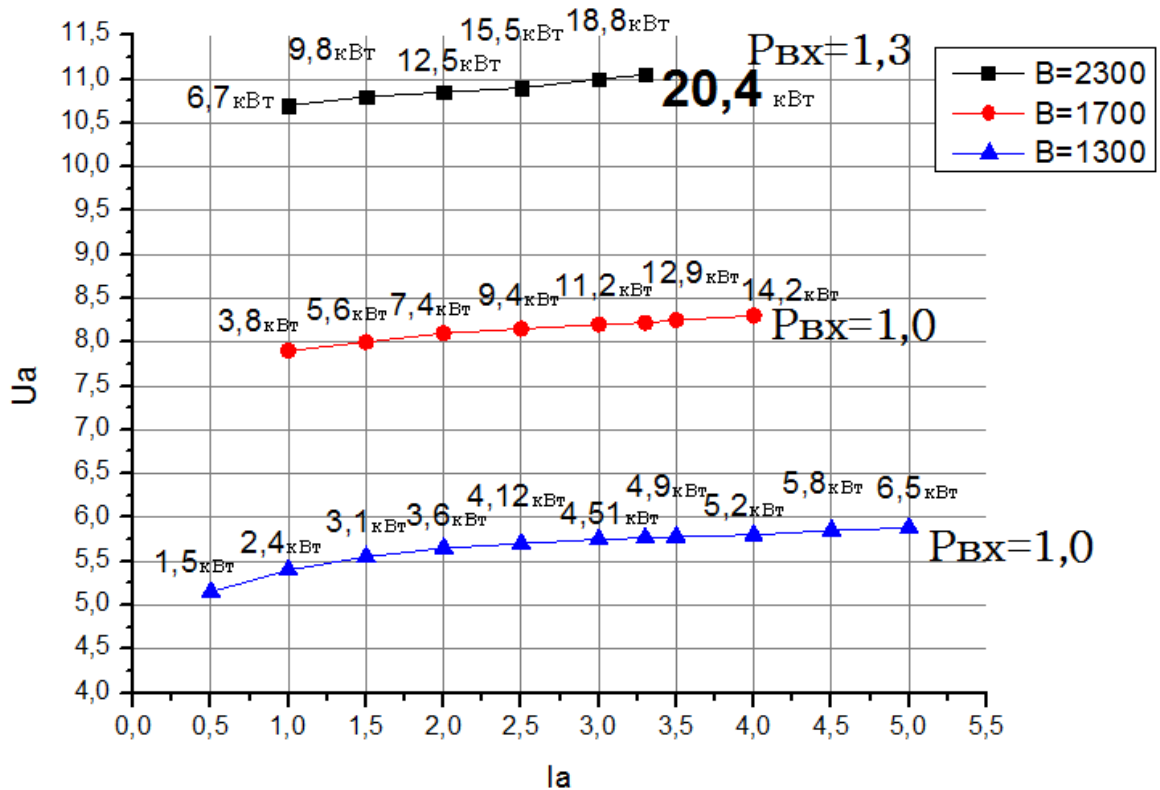


Рисунок 4 – ВАХ с комбинированным методом управления выходной мощностью

Сравнив результаты предыдущего замера электрических параметров при  $P_{вх1}=1,0$  кВт и  $P_{вх1}=1,3$  кВт видно, что при увеличении входной мощности до 1,3 кВт ток срыва анодного тока увеличивается с  $I_a=3,1$  до  $I_a=3,3$  и максимальное значение выходной мощности увеличилось с 17,4 кВт до 20,4 кВт.

Таким образом, диапазон изменения выходной мощности при управлении исследуемыми методами в комплексе возможен в диапазоне с  $P_{вых}=1,54$  кВт до  $P_{вых}=20,4$  кВт или в диапазоне 11 дБ.

### Заключение

В результате проведенных исследований возможности эксплуатации усилителей М-типа в режиме управления выходной мощностью было выявлено следующее:

-при управлении входным сигналом диапазон изменения выходной мощности составляет не менее 1,0 дБ;

-при управлении анодным током диапазон изменения выходной мощности составляет не менее 5,0 дБ;

-при управлении рабочим напряжением диапазон изменения выходной мощности составляет не менее 5,2 дБ;

-при комбинированном методе управления диапазон изменения выходной мощности составляет не менее 11 дБ.

Полученные результаты могут иметь большое практическое значение при построении мощных передающих усилительных модулей для многорежимных РЛС с АФАР и фазированной антенной решеткой (ФАР).

### **Список источников**

1. Канащенков А.И., Новиков С.В., Кулакова Д.С. Создание перспективной малогабаритной многорежимной бортовой радиолокационной системы // Успехи науки и образования. 2016. Т. 3. № 9. С. 103-105.
2. Друзин С.В., Майоров В.В., Горевич Б.Н. Создание перспективной системы вооружения войсковой ПВО нового облика // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2019. № 4. С. 7-18. URL: <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2019-4-7-18>
3. Верба В.С. Анализ состояния и тенденций развития бортовых РЛС авиационных комплексов радиолокационного дозора и наведения // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov12/9/text.html>

4. Быстров Р.П., Гуляев Ю.В., Черепенин В.А., Соколов А.В. Особенности развития радиолокационных систем // Радиотехника. 2010. № 8. С. 71-90.
5. Белоус А.И., Мерданов М.К., Шведов С.В. СВЧ-электроника в системах радиолокации и связи: монография. – М.: Техносфера, 2016. – 688 с.
6. Грундман М. Основы физики полупроводников, нанофизика и технические приложения: монография. – М.: Физматлит, 2012. 772 с.
7. Перовский Э.В., Еремин В.П., Ляшенко А.В., Солопов А.А., Федоренко Е.А. Твердотельно-вакуумные модули для РЛС с фазированными антенными решетками и активными фазированными решетками // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2013. № 1 (76). С. 93-98.
8. Pasternak Irvin. Radar Technology Advancements and New Applications // Microwave Journal California, 2017.
9. Фурсаев М.А., Еремин В.П., Гутцайт Э.М. Усилители М-типа с катодом в пространстве взаимодействия. – М.: МЭИ, 1976. 85 с.
10. Суходолец Л.Г. Мощные Вакуумные СВЧ-приборы. - М.: Изд-во ИКАР, 2014. 272 с.
11. Клэмпитт Л. (ред). Мощные электровакуумные приборы СВЧ. В кн. Усилитель М-типа с распределенной эмиссией. В кн.: Мощные электровакуумные приборы СВЧ. – М.: Мир, 1974. С. 69-101.
12. Jirun Luo et al. A Review of Microwave Vacuum Devices in China: Theory and Device Development Including High-Power Klystrons, Spaceborne TWTs, and Gyro-TWTs

// IEEE Microwave Magazine, April 2021, vol. 22, issue 4. URL:  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9366603>

13. Демин Д.С., Кононенко П.И., Лебеденко В.И. и др. Концепция бортового радиолокатора на основе АФАР с использованием рефлектора с отверждаемым пневмокаркасом // Труды МАИ. 2021. № 119. URL:  
<http://trudymai.ru/published.php?ID=159790>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-12](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-12)

14. Макаров В.Н., Суходолец Л.Г. Перспективы развития мощных передатчиков РЛС с использованием электровакуумных приборов СВЧ // Радиотехника. 2010. № 1. С. 97-106.

15. Ивлиев А.С., Покотиллов С.С. Перспективы развития СВЧ-усилителей // Вестник Новгородского государственного университета. 2020. № 2 (118). С. 72-75. DOI: [10.34680/2076-8052.2020.2\(118\).72-75](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.2(118).72-75)

16. Зыков Л.С. Многодиапазонные излучатели для активных фазированных антенных решёток // Труды МАИ. 2015. № 82. URL:  
<http://trudymai.ru/published.php?ID=58797>

17. Еремин В.П., Трушин А.Н., Федоренко Е.А. Усилители прямой волны М-типа разработки и производства // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. 2013. № 3 (518). С. 147-249.

18. Новиков В.Ф. Механизм возникновения «собственных» нестабильностей фазы в СВЧ приборах // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2017. № 2 (35). С. 84-96. DOI: [10.17212/1727-2769-2017-2-84-96](https://doi.org/10.17212/1727-2769-2017-2-84-96)

19. Федоров Н.Д. Электронные приборы СВЧ и квантовые приборы. – М.: Атомиздат, 1979. - 288 с.

20. Григорьев А.Д., Иванов В.А., Молоковский С.И. Микроволновая электроника. - СПб.: «Лань», 2016. 495 с.

## References

1. Kanashchenkov A.I., Novikov S.V., Kulakova D.S. *Uspekhi nauki i obrazovaniya*, 2016, vol. 3, no. 9, pp. 103-105.

2. Druzin S.V., Maiorov V.V., Gorevich B.N. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz – Antei»*, 2019, no. 4, pp. 7-18. URL: <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2019-4-7-18>

3. Verba V.S. *Zhurnal radioelektroniki*, 2012, no. 1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov12/9/text.html>

---

4. Bystrov R.P., Gulyaev Yu.V., Cherepenin B.A., Sokolov A.V. *Radiotekhnika*, 2010, no. 8, pp. 71-90.

5. Belous A.I., Merdanov M.K., Shvedov S.V. *SVCh-elektronika v sistemakh radiolokatsii i svyazi* (Microwave electronics in radar and communication systems), Moscow, Tekhnosfera, 2016, 688 p.

6. Grundman M. *Osnovy fiziki poluprovodnikov, nanofizika i tekhnicheskie prilozheniya* (Fundamentals of semiconductor physics, nanophysics and technical applications), Moscow, Fizmatlit, 2012, 772 p.

7. Perovskii E.V., Eremin V.P., Lyashenko A.V., Solopov A.A., Fedorenko E.A. *Izvestiya Rossiiskoi akademii raketnykh i artilleriiskikh nauk*, 2013, no. 1 (76), pp. 93-98.

8. Pasternak Irvin. Radar Technology Advancements and New Applications, *Microwave Journal California*, 2017.
9. Fursaev M.A., Eremin V.P., Guttsait E.M. *Usiliteli M-tipa s katodom v prostranstve vzaimodeistviya* (M-type amplifiers with a cathode in the interaction space), Moscow, MEI, 1976, 85 p.
10. Sukhodolets L.G. *Moshchnye Vakuurnye SVCh-pribory* (Powerful vacuum microwave devices), Moscow, Izd-vo IKAR, 2014, 272 p.
11. Klempitt L. (red). *Moshchnye elektrovakuurnye pribory SVCh. V kn. Usilitel' M-tipa s raspredelenoi emissiei*. (M-type amplifier with distributed emission. In the book: Powerful electrovacuum microwave devices), Moscow, Mir, 1974, pp. 69-101.
12. Jirun Luo et al. A Review of Microwave Vacuum Devices in China: Theory and Device Development Including High-Power Klystrons, Spaceborne TWTs, and Gyro-TWTs, *IEEE Microwave Magazine*, April 2021, vol. 22, issue 4. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9366603>
13. Demin D.S., Kononenko P.I., Lebedenko V.I. et al. *Trudy MAI*, 2021, no. 119. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=159790>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-12](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-12)
14. Makarov V.N., Sukhodolets L.G. *Radiotekhnika*, 2010, no. 1, pp. 97-106.
15. Ivliev A.S., Pokotilov S.S. *Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, no. 2 (118), pp. 72-75. DOI: [10.34680/2076-8052.2020.2\(118\).72-75](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.2(118).72-75)
16. Zykov L.S. *Trudy MAI*, 2015, no. 82. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=58797>

17. Eremin V.P., Trushin A.N., Fedorenko E.A. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 1: SVCh-tekhnika*, 2013, no. 3 (518), pp. 147-249.
18. Novikov V.F. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii*, 2017, no. 2 (35), pp. 84-96. DOI: [10.17212/1727-2769-2017-2-84-96](https://doi.org/10.17212/1727-2769-2017-2-84-96)
19. Fedorov N.D. *Elektronnye pribory SVCh i kvantovye pribory* (Microwave electronic devices and quantum devices), Moscow, Atomizdat, 1979, 288 p.
20. Grigor'ev A.D., Ivanov V.A., Molokovskii S.I. *Mikrovolnovaya elektronika* (Microwave electronics), Saint Petersburg, «Lan'», 2016, 495 p.

Статья поступила в редакцию 21.01.2022; одобрена после рецензирования 11.02.2022; принята к публикации 21.02.2022.

The article was submitted on 21.01.2022; approved after reviewing on 11.02.2022; accepted for publication on 21.02.2022.