

А. В. ВАСЯНОВИЧ, Г. И. ЧУРЮМОВ
ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ АМПЛИТРОНА
НА УРОВНИ ГАРМОНИК

Вопросы улучшения выходных интегральных характеристик магнетронных усилителей находятся в неразрывной связи с требованиями, которые предъявляются к их выходному спектру. Связано это с тем, что на выходе магнетронных усилителей, кроме усиленного сигнала основной частоты, содержатся и нежелательные побочные излучения, возникающие в результате нелинейности процесса электронно-волнового взаимодействия [1]. Среди указанных излучений особое место отводится гармоникам основного сигнала. Поэтому при расчете выходных параметров магнетронных усилителей весьма актуальной становится задача исследования физических механизмов генерации гармоник, а также анализ их возможных уровней в различных режимах работы усилителя. Так, в работе [2] приведены результаты численных расчетов уровней гармонических составляющих в выходном спектре амплитрона, показано их установление, а также зависимость уровней гармоник от анодного напряжения U_A при различных величинах статического магнитного поля B_0 . Однако данные расчеты проводились в узком интервале значений U_A и B_0 , а диапазон анодного напряжения выбирался в низковольтной области ВАХ амплитрона. В связи с этим представляется интерес теоретические исследования уровней гармоник в выходном спектре амплитрона на всем рабочем участке ВАХ в широком интервале значений входной мощности основного сигнала, а также оценка их поведения при изменении величины индукции статического магнитного поля и суммарного токоотбора с катода.

Для проведения вычислительного эксперимента воспользуемся многопериодной двухмерной математической моделью амплитрона, алгоритм реализации которой приведен в [2, 3]. Основу модели составляет самосогласованная система интегро-дифференциальных уравнений движения, возбуждения и уравнения Пуассона. Численное решение данной системы уравнений требует введения начальных условий для электронного потока в момент времени $t=0$ и амплитуд ВЧ волн на входе прибора при $\varphi=0$.

В качестве начального состояния электронного потока выбирается электронная втулка, которая устанавливается в пространстве взаимодействия до момента подачи сигнала в условиях существования статического режима работы [2]. Подавая на вход прибора сигнал с частотой ω и амплитудой, равной

$$A_1 = \frac{\gamma_1 \ln(r_A/r_K)}{U_A} \sqrt{2P_{вх}^1 R_1}, \quad (1)$$

где $P_{вх}^1$ — мощность основного сигнала на входе; γ_1 — постоянная распространения; R_1 — сопротивление связи на уровне ЗС; r_A и r_K — радиусы анода и катода, получаем на выходе усиленный сигнал частоты ω и его гармоники 2ω , 3ω и т. д. Из данных рассуждений следует, что входные амплитуды для гармоник необходимо выбирать равными нулю. Однако особенность записи уравнений модели амплитрона не позволяет осуществить в этом случае их численное решение. Поэтому начальные значения для амплитуд гармоник A_n выбираются равными уровню «машинных» шумов, которые сопутствуют вычислительному эксперименту и связаны с ошибками округления. Апостериорная оценка погрешности округления вещественных чисел на ЭВМ показывает, что уровень «машинных» шумов по отношению к уровню представляемых чисел для 32-разрядных ЭВМ составляет — (60 ... 65) дБ. Поэтому начальные значения для нормированных амплитуд гармоник $K_n = 20 \lg \frac{A_n}{A_1}$ выбираются в указанном диапазоне значений. Выбор меньшего значения для

начальных амплитуд гармоник практически не влияет на их уровень в установившемся режиме, однако в этом случае увеличивается время установления стационарного состояния.

Особый интерес при анализе многочастотного взаимодействия вызывает характер дисперсии ЗС и зависимость сопротивления связи от частоты. Определение этих параметров на частотах гармоник вызывает значительные трудности, обусловленные необходимостью расчета постоянных распространения ВЧ волн в высших полосах пропускания ЗС. Поэтому моделирование проводится в предположении, что все учитываемые ВЧ сигналы попадают в основную и высшие полосы пропускания ЗС, т. е. постоянные распространения данных волн γ_n являются действительными числами, удовлетворяющими условию $\gamma_n = n\gamma_1$, при выполнении которого дисперсионные свойства ЗС не учитываются. Зависимость сопротивления связи от частоты аппроксимируется выражением $R_n = 0,25R_1/n$. Такой выбор закона изменения R_n от частоты физически корректен, так как соответствует утверждению, что с ростом ω величина R_n уменьшается [4].

Рассмотрим основные результаты моделирования процессов многочастотного взаимодействия в амплитроне сантиметрового диапазона со следующими параметрами: $r_K/\lambda = 0,0064$; $r_A/\lambda = 0,01$; $\Delta x/\lambda = 0,027$; $N = 17$; $\gamma_1 = 7$; $R_1 = 50$ Ом; $B_0 = 0,25$ Т. Расчеты проводятся в предположении идеального согласования ЗС амплитрона с входными и выходными устройствами, а также в отсутствие конкуренции основного (рабочего) вида колебания с возбуждаемым высоковольтным и низковольтным видами.

Результаты расчетов представлены на рис. 1, 2. На них кривые: 1 — 2ω , 2 — 3ω , 3 — 4ω , 4 — $P_{\text{вых}}$. Видно: в случае фиксированной мощности на входе $P_{\text{вх}} = 10$ кВт уровни гармоник достигают максимума при значении анодного напряжения $U_A = U_A^c = 14170$ В, соответствующем условию синхронного вращения спиц пространственного заряда и ВЧ волн на частотах гармоник (рис. 1). Уменьшение ($U_A < U_A^c$) или увеличение ($U_A > U_A^c$) анодного напряжения приводит к изменению скорости вращения электронного потока. В результате появляется фазовое смещение спиц пространственного заряда относительно максимумов торсионных фаз тангенциальных составляющих ВЧ полей гармоник, что приводит к ухудшению энергообмена между электронным потоком и данными ВЧ волнами и, как следствие этого, понижению уровней гармоник. Поэтому для обеспечения работы усилителя с пониженным уровнем гармоник необходимо выбирать режим по анодному напряжению ближе к краям рабочего диапазона ВАХ, ограниченного участками возбуждения низковольтного и высоковольтного видов колебаний. При этом предпочтение отдается высоковольтной области значений U_A , так как в этом случае значения выходных параметров основного сигнала выше.

Изменение уровня входной мощности приводит к соответствующим изменениям и уровней гармоник (рис. 2). Для выбранных значений сопротивления связи R_n переход в область малых входных мощностей уменьшает степень и характер нелинейности процесса электронно-волнового взаимодействия, что выражается в уменьшении амплитуд гармоник с ростом ее номера. Однако абсолютная величина такого уменьшения незначительна и для второй и третьей гармоник не превышает 2 и 4 дБ соответственно при изменении мощности входного сигнала в диапазоне рабочих значений от 4 кВт до 10 кВт.

Представленные результаты получены для случая фиксированного токоотбора с катода в предположении, что в начальный момент времени $t = 0$ включается термоэлектронная эмиссия, а затем отбор тока с катода осуществляется за счет вторичной электронной эмиссии. Максимальный коэффициент вторичной эмиссии σ_m выбирался равным 2,5. Изменяя σ_m , можно добиться управления током вторичной эмиссии. При значении $\sigma_m = 3,5$ имеет место рост токоотбора с катода в 1,1 раза. Это приводит к повышению как параметров основного сигнала (КПД на

10 % и коэффициента усиления на 1—2 дБ), так и уровней его гармоник: второй на 2—3 дБ; третьей и четвертой на 5—7 дБ. Одновременно на 3—4 периода основного сигнала сокращается время установления стационарного состояния процесса взаимодействия.

Из рис. 1 видно, что максимум уровня гармоник достигается при $B_0 = 0,25$ Т и $U_A = U_{cA}$. Изменение индукции статического магнитного поля в диапазоне $B_0(1 \pm 0,03)$ при условии, что $U_A = \text{const}$, приводит к понижению уровней гармоник. Анализ показывает, что относительная

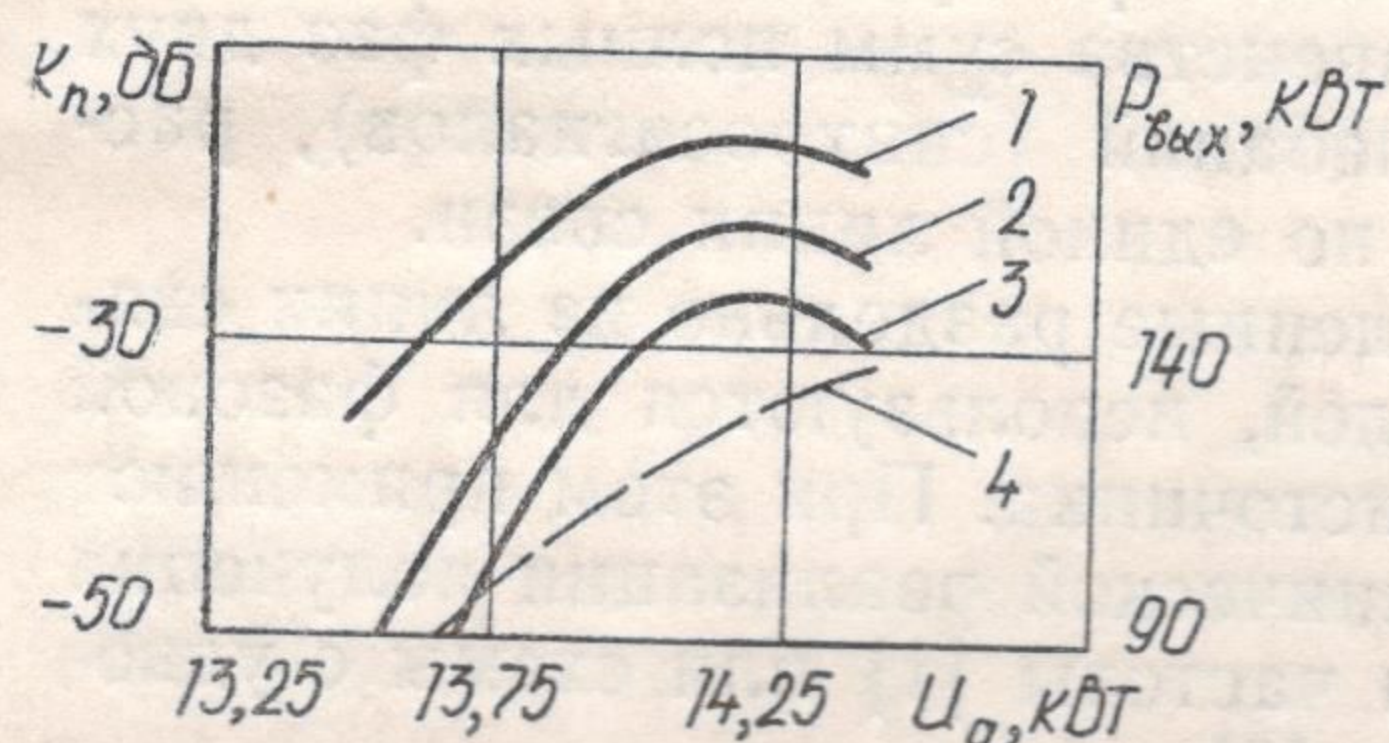


Рис. 1

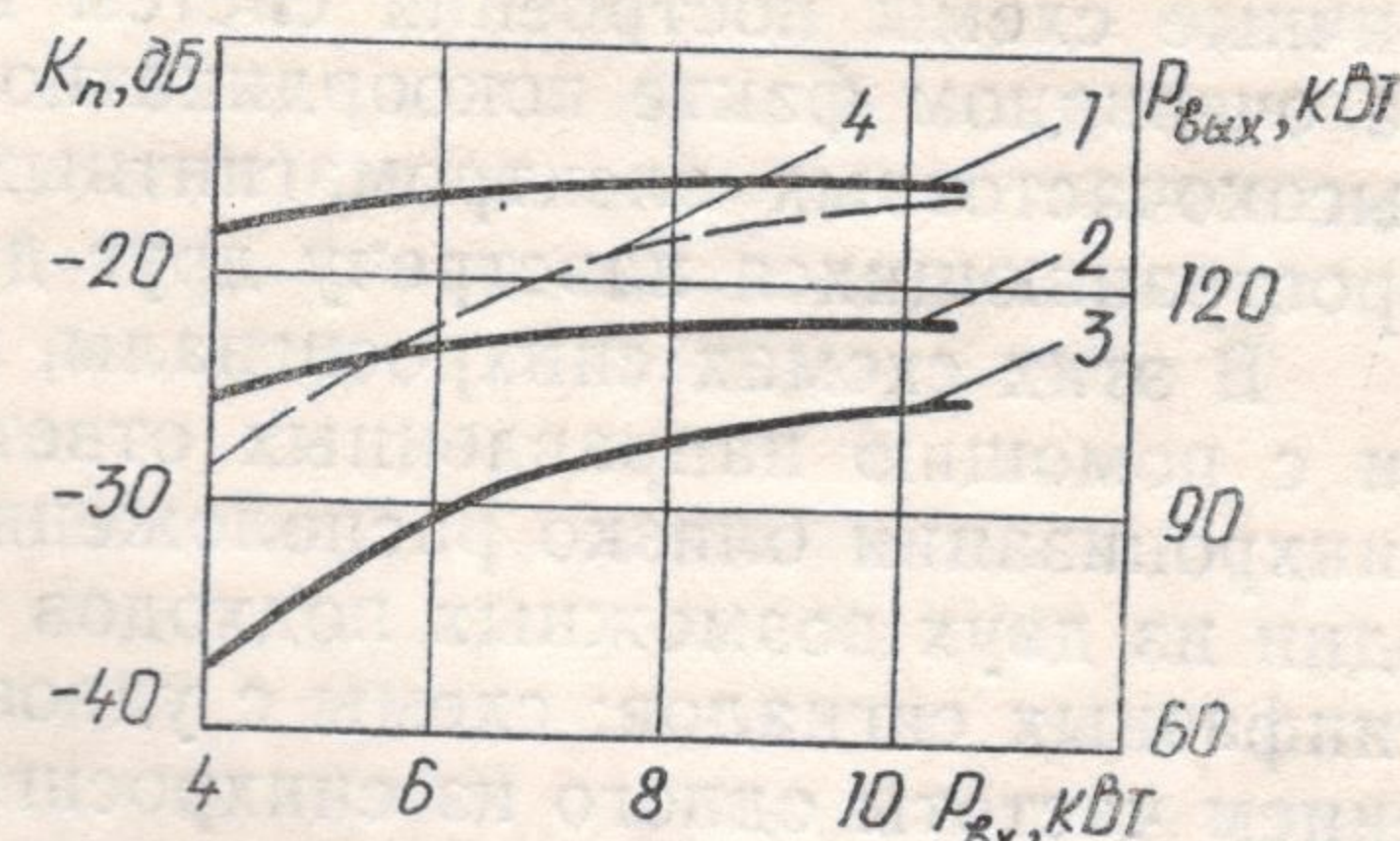


Рис. 2

величина такого уменьшения одинакова как в случае, представленном на рис. 1, так и в случае, когда $U_A = \text{const}$, а значение индукции магнитного поля изменяется.

Таким образом, представленные теоретические исследования с учетом введенных ограничений позволяют рассмотреть уровни гармоник в амплитроне и оценить возможность их уменьшения за счет выбора оптимального режима работы при использовании катодов с различными характеристиками. Полученные результаты показывают, что выбору режимов работы усилителя с пониженным уровнем гармоник сопутствует ухудшение рабочих параметров амплитрона на частоте основного сигнала. Увеличение токоотбора с катода улучшает характеристики основного сигнала с одновременным повышением уровней гармоник. В то же время показана принципиальная возможность эффективного управления уровнями гармоник с ростом «холодного» рассинхронизма между спицами пространственного заряда и ВЧ волнами на частотах гармоник. Данный результат представляет наибольший практический интерес, так как позволяет уменьшить уровни гармоник без ухудшения остальных рабочих характеристик усилителя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Побочные колебания в электронных приборах СВЧ / О. В. Бецкий, К. И. Палатов, М. Б. Цейтлин, Ю. Д. Ильин. — М.: Радио и связь, 1984. — 152 с.
2. Васянович А. В., Чурюмов Г. И. Исследование выходного спектра магнетронного усилителя обратной волны методом машинного эксперимента // Радиотехника. — 1989. — Вып. 90. — С. 126—130.
3. Васянович А. В. Численная модель многочастотного взаимодействия в усилителях М-типа с распределенной эмиссией // Радиотехника. — 1987. — Вып. 80. — С. 90—96.
4. Силин Р. А., Сазонов В. П. Замедляющие системы. — М.: Сов. радио, 1966. — 632 с.

Поступила в редакцию 11.06.91.

УДК 621.396.66.029.6

В. В. ДЕНИСЕНКО, В. И. КИЯКО, А. В. МАКАРОВ ВЗАИМНОЕ ФАЗИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО РАЗНЕСЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЧ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ПОМОЩИ ОБЩЕЙ ЛИНИИ СВЯЗИ

Формирование синфазных СВЧ колебаний в удаленных друг от друга точках является необходимым этапом при создании радиоинтерферометров, фазированных антенных решеток, устройств сложения мощностей. Допустимая величина межканальной взаимной неидентичности