

УДК 621. 396. 614

**АНАЛИЗ РАБОТЫ САМОСИНХРОНИЗИРОВАННОГО МАГНЕТРОНА**

В.А. ОСИПОВ, С.А. ШОСТАК

*Военная академия Республики Беларусь  
пр. Независимости, 220, Минск, 220057, Беларусь**Поступила в редакцию 12 июня 2012*

Приводится упрощенный анализ работы самосинхронизированного магнетрона, основанный на векторном представлении действующих токов и напряжений, а также приводятся некоторые теоретические выводы и результаты экспериментальных проверок полученных соотношений. Показана возможность применения серийных магнетронов в режиме самосинхронизации для целей получения частотно и амплитудно-модулированных колебаний.

*Ключевые слова:* синхронизация, самосинхронизация, автогенератор, эквивалентная схема, векторные диаграммы.

**Введение**

Магнетроны относятся к наиболее эффективным и широко применяемыми в СВЧ-диапазоне генераторным приборам. Это мощные автогенераторы, они работают на фиксированной частоте или с электромеханической перестройкой в относительно узком диапазоне частот (5–10%), дециметровых, сантиметровых и миллиметровых волн, как в режиме непрерывной генерации, так и в импульсном или пакетно-импульсном режиме. Достигнутые на сегодняшний день уровни мощности в импульсном режиме составляют единицы – десятки мегаватт в дециметровом диапазоне при КПД до 85%. Они широко применяются в радиолокации, радионавигации, в промышленности и быту, в радиолиниях дальней связи и других устройствах. Производство магнетронов хорошо освоено промышленностью, вследствие чего их стоимость, по сравнению с другими СВЧ-генераторами такой же мощности, невелика. Другими преимуществами магнетронов являются простота конструкции, высокий КПД, возможность получения больших мощностей при низких анодных напряжениях (10–50 кВ), сравнительно продолжительный ресурс работы (до 5000 часов) и высокие массогабаритные показатели. Это позволило магнетронам занять доминирующее положение среди мощных автогенераторов СВЧ. Однако магнетронам присущи и серьезные недостатки. Это, в первую очередь, низкая стабильность частоты ( $\sim 10^{-3}$  с учетом как электронного смещения частоты – ЭСЧ, так и затягивания частоты). Другим недостатком серийных магнетронов следует считать возможность их работы только в непрерывном и импульсных режимах. В них невозможно получить высококачественную частотную или амплитудную модуляцию. С электрической точки зрения магнетрон – это диод, имеющий всего два электрода, вследствие чего модуляцию доступно производить только изменением питающих напряжений на этих электродах. Вследствие специфики работы магнетрона, всякое изменение питающих напряжений приводит к изменению частоты генерируемых колебаний, т.е. к частотной модуляции вследствие электронного смещения частоты. Однако девиация частоты получается крайне незначительной, а форма модуляционной характеристики отличается значительной нелинейностью. Частотная модуляция при этом сопровождается глубокой паразитной амплитудной модуляцией [1–4]. Более того, частотные модуляционные характеристики являются индивидуальными для каждого экземпляра магнетрона выбранного типа.

Всякие попытки получения в магнетроне глубокой амплитудной модуляции посредством изменения анодного напряжения приводят к неизбежной паразитной частотной модуля-

ции, «перескоку» частоты либо к полному срыву генерации. Именно поэтому в серийных магнетронах не производят частотную и амплитудную модуляцию посредством изменения анодного напряжения. Разработаны специальные магнетроны, позволяющие осуществлять частотную модуляцию. Однако это уже совершенно другие приборы, которые значительно уступают по основным энергетическим и другим показателям серийным магнетронам [1,5,6]. Между тем, магнетроны в режиме самосинхронизации (ССМ) позволяют, в основном, решить вопросы амплитудной и частотной модуляции в серийных магнетронах, освоенных промышленностью [7]. Целью статьи является упрощенный анализ работы самосинхронизированного магнетрона, основанный на векторном представлении действующих токов и напряжений и вывод основных соотношений, показывающих возможность использования серийных магнетронов для получения частотно и амплитудно-модулированного колебаний.

### Принцип самосинхронизации магнетрона и его особенности

Структурная схема магнетрона в режиме самосинхронизации изображена на рис. 1. Выход магнетрона 1 соединен с первым плечом ферритового циркулятора 2, второе плечо которого связано с согласованной нагрузкой 4 и через направленный ответвитель 3, аттенуатор 5 и фазовращатель 6 замыкается на третье плечо циркулятора 2 [8].

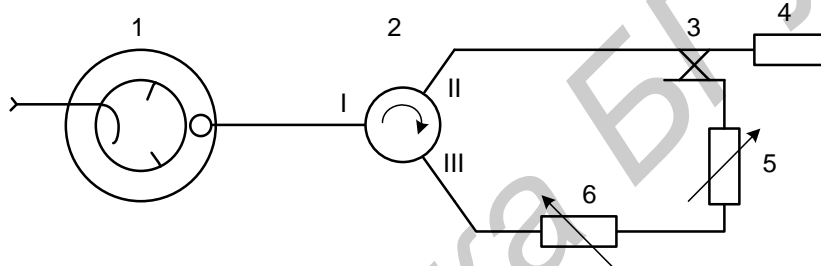


Рис. 1. Структурная схема самосинхронизированного магнетрона

СВЧ-генератор работает следующим образом. Сигнал с выхода магнетрона через второе плечо циркулятора поступает в согласованную нагрузку 4. Одновременно часть сигнала магнетрона через направленный ответвитель 3, аттенуатор 5, фазовращатель 6 и третье плечо циркулятора вновь вводится в колебательную систему магнетрона. Эти элементы образуют вторую, внешнюю (дополнительную) цепь обратной связи. Выбором затухания направленного ответвителя и аттенуатора 5, добиваются величины мощности в третьем плече циркулятора (выходе магнетрона), достаточной для его синхронизации собственным сигналом. Иными словами, от известных схем синхронизации приведенная схема отличается тем, что в качестве синхронизирующего сигнала используется не сигнал от внешнего генератора, а собственный сигнал магнетрона. Это значит, что фазовый сдвиг, вносимый в систему «генератор тока – эквивалентный колебательный контур» [8] обусловлен не разностью частот синхронизирующего сигнала и собственных колебаний контура, а задержкой собственного сигнала во внешней цепи обратной связи. Иными словами, в цепи обратной связи появляется новое колебание с частотой  $\omega_1$  и амплитудой  $I_c$ . В результате сложения двух мало отличающихся по частоте колебаний образуются биения.

Для момента времени  $t$  справедливо следующее равенство [7]:

$$I_c \cos(\omega_1 t - \theta - \varphi_{oc}) + I_{н1} \cos(\omega_2 t - \theta) = I'_{н1} \cos(\omega_1 t - \theta' t). \quad (1)$$

Здесь  $I_c$  – ток синхронизации;  $\omega_1$  – частота магнетрона в режиме самосинхронизации;  $\theta$  – фазовый сдвиг тока колебательной системы в автономном режиме;  $\varphi_{oc}$  – фазовый сдвиг сигнала в цепи обратной связи;  $\omega_2$  – частота магнетрона в автономном режиме;  $I_{н1}$  – наведенный ток в автономном режиме;  $I'_{н1}$  – наведенный ток в режиме самосинхронизации;  $\theta'$  – фазовый сдвиг тока колебательной системы в режиме самосинхронизации.

В [7] получены уравнения для установившихся значений амплитуды и фазы в любом синхронизированном автогенераторе.

$$\begin{cases} \frac{\omega_c - \omega_r}{\omega_r} 2Q_n + \operatorname{tg}\theta + \frac{I_{н1}}{gu} \sin\theta = \frac{I_c}{gu} \sin\varphi, \\ U - \frac{I_{н1}}{g} \cos\theta = \frac{I_c}{g} \cos\varphi, \end{cases} \quad (2)$$

где  $g$  – проводимость колебательной системы магнетрона;  $u$  – мгновенное значение напряжения на колебательной системе;  $Q_n$  – нагруженная добротность колебательной системы магнетрона.

Учитывая, что  $I_c = \frac{I_n}{k}$ , где  $k$  – суммарный коэффициент затухания направленного ответвителя и аттенюатора 5 (рис. 1), уравнения (2) можно переписать в виде:

$$U - \frac{I_{н1}}{g} \cos\theta = \frac{I_{н1}}{gk} \cos(\theta + \varphi_{oc}), \quad (3)$$

$$\frac{\omega - \omega_r}{\omega_r} 2Q_n + \operatorname{tg}\theta + \frac{I_{н1}}{gu} \sin\theta = \frac{I_{н1}}{gku} \sin(\theta + \varphi_{oc}). \quad (4)$$

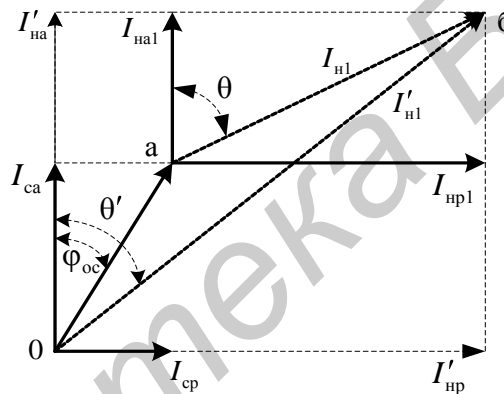


Рис 2. Векторная диаграмма токов самосинхронизированного магнетрона

Для определения частоты самосинхронизированного магнетрона в установившемся режиме воспользуемся уравнением (4). Принимая во внимание, что амплитуда напряжения на колебательной системе в автономном режиме  $U_0 = \frac{I_{н1}}{g} \cos\theta$  и режиме самосинхронизации приблизительно равны, т.е.  $U \approx U_0$ , перепишем (4) в виде:

$$\frac{\omega - \omega_r}{\omega_r} 2Q_n + 2\operatorname{tg}\theta = \frac{1}{k} \frac{\sin(\theta + \varphi_{oc})}{\cos\theta}. \quad (5)$$

Отсюда

$$\omega_1 = \omega_r \left[ 1 + \frac{1}{2Q_n} \left( \frac{1}{k} \frac{\sin(\theta - \varphi_{oc})}{\cos\theta} - 2\operatorname{tg}\theta \right) \right]. \quad (6)$$

Для определения коэффициента электронного смещения частоты в самосинхронизированном магнетроне воспользуемся векторной диаграммой рис. 2, где дополнительно показаны вектора активных и реактивных составляющих наведенных токов.

Угол рассогласования в магнетроне с внешней дополнительной обратной связью будет равен

$$\theta' = \arctg \left[ \operatorname{tg} \theta - \frac{1}{\kappa} \frac{\sin(\theta - \varphi_{oc})}{\cos \theta} \right]. \quad (7)$$

Относительный коэффициент электронного смещения частоты (ЭСЧ) в самосинхронизированном режиме равен

$$\zeta' = \frac{\left(1 - \frac{1}{\kappa} \cos \varphi_{oc}\right) \frac{1}{\cos^2 \theta}}{1 + \left[ \operatorname{tg} \theta - \frac{1}{\kappa} \frac{\sin(\theta - \varphi_{oc})}{\cos \theta} \right]^2} \frac{d\theta}{dI_0}. \quad (8)$$

Как известно, под электронным смещением частоты автогенераторов понимают изменение частоты генерируемых автогенератором колебаний при изменении тех или иных питающих напряжений. Поскольку магнетроны имеют малое внутреннее динамическое сопротивление, то для них иногда более удобно под ЭСЧ понимать изменение частоты, отнесенное не к изменению анодного напряжения, а к постоянной составляющей анодного тока  $I_0$ . Выходная мощность самосинхронизированного магнетрона, как следует из векторной диаграммы, при определенных фазовых сдвигах в цепи обратной связи может увеличиваться в сравнении с автономным режимом магнетрона. Физически это можно объяснить тем, что при определенных фазовых сдвигах сигнала в цепи обратной связи возрастает как тангенциальная, так и радиальная составляющие электрического поля колебательной системы магнетрона, улучшаются условия фокусировки электронного потока в «спицы» и, как следствие, передача энергии от электронного потока переменному электрическому полю колебательной системы. Однако следует заметить, что при других фазовых сдвигах выходная мощность магнетрона может даже уменьшиться в сравнении с автоколебательным режимом.

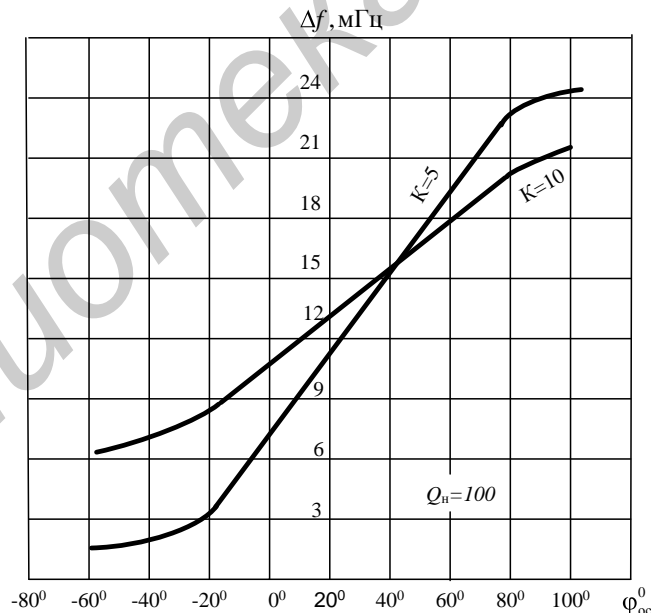


Рис. 3. Модуляционная характеристика самосинхронизированного магнетрона

Кратко остановимся на качественном пояснении полученных соотношений. Из формулы (7) видно, что при изменении фазы в цепи дополнительной обратной связи, генератор изменяет генерируемую частоту. На рис. 3 приведена модуляционная характеристика для магнетрона 3-х сантиметрового диапазона, построенная с использованием формул (7) и (8).

График для абсолютного значения коэффициента электронного смещения частоты в соответствии с формулой (8) приведен на рис. 4. Из вида модуляционной характеристики (рис. 3) можно сделать вывод о ее достаточно высокой линейности и возможности практического использования самосинхронизированного магнетрона для получения частотно-модулированных колебаний. Диапазон перестройки самосинхронизированного магнетрона тем больше, чем больше величина

мощности в цепи дополнительной обратной связи и чем больше величина задержки сигнала в ней. Частотную модуляцию легко получить, используя в качестве фазовращателя 6 (рис. 1) быстродействующий фазовращатель с электронным управлением.

Коэффициент электронного смещения частоты (см. рис. 4) в магнетроне с дополнительной обратной связью в несколько раз меньше и зависит от мощности в цепи обратной связи, т.е. коэффициента  $k$ . Таким образом, теоретический анализ показывает значительное улучшение характеристик магнетрона с дополнительной обратной связью в сравнении с автономным режимом, а экспериментальное исследование подтверждает этот вывод.

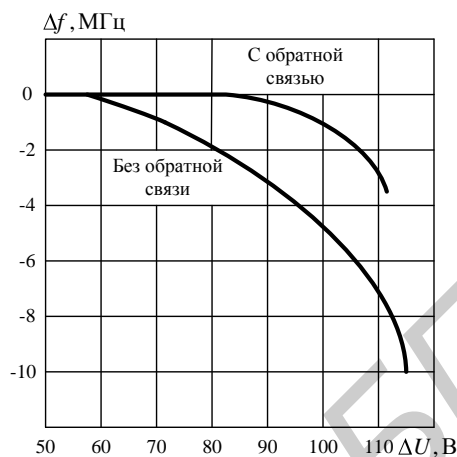


Рис. 4. Электронное смещение частоты магнетронов в автономном режиме и в режиме самосинхронизации

### Результаты эксперимента

Экспериментальные исследования проводились на пакетированных самосинхронизированных магнетронах 3-х сантиметрового диапазона волн непрерывной (магнетроны типа М857) и импульсной (магнетроны типа МИ189-Г) генерации. Следует сразу заметить, что каких-либо существенных отличий в экспериментально полученных параметрах и характеристиках магнетронов разного вида генерации не выявлено. Поэтому можно рассмотреть только некоторые параметры синхронизированного магнетрона импульсной генерации. Экспериментальная установка была выполнена по схеме рис.1. Измерение мощностей в нагрузке и цепи обратной связи производилось с использованием калиброванных направленных ответвителей из комплекта «Хвоя-М» и ваттметров МЗ-10А. Механически перестраиваемый прецизионный фазовращатель 6 и аттенуатор 5 (рис.1) использовались из этого же комплекта. Временная задержка сигнала в цепи дополнительной обратной связи определялась длиной волноводной линии, составляющей 2100 мм. Одновременно исследовалась возможность применения в качестве элемента задержки в цепи обратной связи 3-х звенного полосопропускающего волноводного фильтра с временем задержки 0,0007 мкс и затуханием в полосе пропускания 3 дБ. Измерение частоты производилось частотомером ЧЗ-19. В результате проведенного эксперимента было установлено, что для получения устойчивой самосинхронизации магнетрона необходимо, чтобы мощность в цепи обратной связи была не менее 0,03 мощности в нагрузке. При меньших значениях мощности в цепи запаздывающей обратной связи (ЗОС) магнетрон работает в обычном автоколебательном режиме.

Частота и мощность в нагрузке самосинхронизированного магнетрона зависят от фазового сдвига в цепи обратной связи. Эти зависимости приведены на рис. 5. Из графиков следует, что частота самосинхронизированного магнетрона линейно зависит от фазового сдвига в цепи обратной связи. При обратном изменении фазы ход кривых повторяется и кривые совпадают, т.е. гистерезис в изменении частоты отсутствует. С увеличением мощности в цепи обратной связи диапазон частотной перестройки и крутизна статической модуляционной характеристики возрастают. На краях диапазона перестройки линейная зависимость частоты от фазы в цепи обратной связи нарушается, а при дальнейшем изменении фазы в любую сторону магнетрон переходит в крайне неустойчивый двухчастотный режим работы.

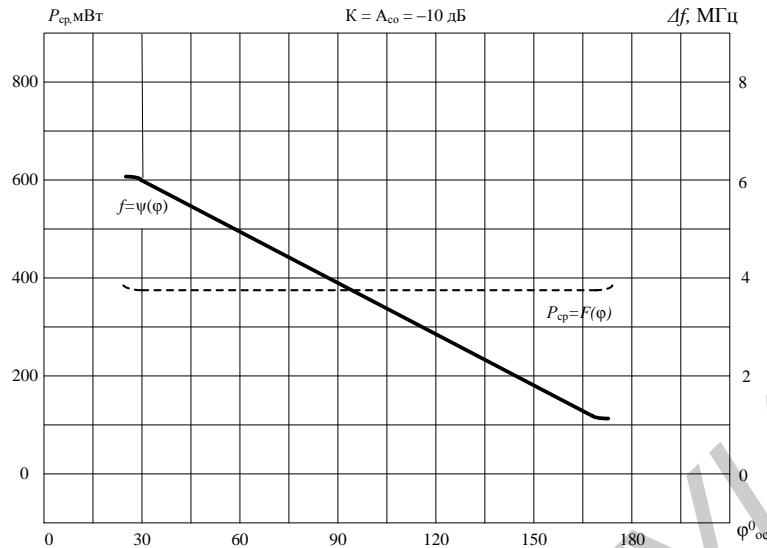


Рис 5. Зависимости мощности и частоты от фазы в цепи обратной связи при затухании  $-10$  дБ

В пределах полосы перестройки генерируемая мощность практически не изменяется. Во всяком случае, ее изменения не превосходят 5% от мощности в нагрузке. На краях полосы перестройки выходная мощность несколько увеличивается. Помимо этого, проведенные экспериментальные исследования показывают возможность устойчивой работы самосинхронизированного магнетрона при расширенных значениях анодного тока, что позволяет без искажений частотного спектра уменьшить выходную мощность более чем в 3 раза [8]. Это можно объяснить значительным уменьшением ЭСЧ самосинхронизированного магнетрона в сравнении с автономным режимом.

С точки зрения процесса энергообмена в пространстве взаимодействия магнетрона, ЭСЧ определяет запаздывание центра электронной «спицы» с максимальной плотностью электронов относительно тангенциальной составляющей СВЧ напряжения резонатора, определяющую передаваемую мощность колебательной системе. При значительном ЭСЧ это запаздывание становится недопустимо большим, что нарушает амплитудное условие самовозбуждения и приводит, в конечном итоге, либо к полному срыву генерации, либо к скачкообразному переходу на другой вид колебаний. В самосинхронизированном магнетроне ЭСЧ значительно меньше, что обеспечивает его работу при расширенных значениях анодного тока (напряжения). А это, в свою очередь, позволяет использовать самосинхронизированный магнетрон для получения амплитудно-модулированных сигналов с большой глубиной модуляции. Как уже отмечалось, электронное смещение частоты в самосинхронизированном магнетроне в сравнении с автоколебательным режимом значительно уменьшается. Если для исследуемого магнетрона ЭСЧ в автоколебательном режиме составляет приблизительно  $50$  кГц/В, то в режиме самосинхронизации менее  $10$  кГц/В.

### Выводы

В статье рассмотрен принцип работы самосинхронизированного магнетрона. Посредством векторной диаграммы получены аналитические соотношения для амплитуды и частоты выходного сигнала, а также их зависимости от фазы сигнала синхронизации в цепи обратной связи. Произведен анализ теоретических соотношений и результатов экспериментального исследования. Установлено, что они находятся в удовлетворительном отношении. Стабильность частоты самосинхронизированного магнетрона возрастает на порядок, практически без потери выходной мощности. Магнетрон в режиме самосинхронизации позволяет работать как в режиме частотной, так и амплитудной модуляции. При увеличении мощности синхронизации в цепи внешней обратной связи перестройка частоты увеличивается аналогично режиму известной синхронизации от внешнего генератора.

## THE ANALYSIS OF AUTOSYNCHRONIZED MAGNETRON WORK

V.A. OSIPOV, S.A. SHOSTAK

### Abstract

Simplified analysis of auto synchronized magnetron behavior that based on vector representation of root-mean-square currents and voltages is offered. Some theoretical summary and experimental check results of obtained relationships are given. Possibility of serial auto synchronized magnetrons for frequency- and amplitude-modulated oscillations generation is indicated.

### Список литературы

1. *Лебедев И.В.* Генераторы и усилители СВЧ. М., 2005.
2. *Каргин А.Н.* // Электронная техника. 1984. Вып. 2.
3. *Алексеев О.В.* Генераторы высоких и сверхвысоких частот. М., 2003.
4. *Опадчий Н.Ф., Глудкин О.Г., Гуров А.И.* Аналоговая и цифровая электроника. М., 1999.
5. *Лебедев И.В.* Техника и приборы СВЧ. М., 1972.
6. *Вамберский М.В., Казанцев В.И., Шелухин С.А.* Передающие устройства СВЧ. М., 1984.
7. *Минаев М.И.* Радиопередающие устройства сверхвысоких частот. Минск, 1974.
8. Авторское свидетельство №375026. СВЧ генератор / Бригидин А.М., Дунаева Г.П., Капышев В.И., Минаев М.И., Осипов В.А.