

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 3—1959

Ю. Р. ЛЕМЗАЛЬ, И. И. МИНАКОВА, З. И. САВЕЛЬЕВА

СИНХРОНИЗАЦИЯ МАГНЕТРОНА МАЛОЙ ВНЕШНЕЙ СИЛОЙ

§ 1

Представляется весьма перспективным использовать синхронизацию автоколебаний магнетрона колебаниями маломощного более стабильного генератора СВЧ для управления частотой магнетрона, а также для стабилизации его частоты. В литературе имеются данные об использовании синхронизации магнетрона для стабилизации его частоты при амплитудной модуляции [1, 2] и о попытках управления частотой магнетронов с дополнительными сетками [3]. Однако во всех этих случаях речь идет о воздействии внешних генераторов сравнимой или большей мощности.

Теоретически рассмотрение задачи возможно обычно только для весьма идеализированной эквивалентной схемы, когда генератор СВЧ, представляющий собой сложную автоколебательную систему со многими степенями свободы, изображается как колебательный контур с сосредоточенными параметрами, ток в котором наводится пролетающим электронным потоком. В подобной эквивалентной схеме может быть учтено влияние запаздывания, нагрузки и т. д. Теоретическое рассмотрение явления синхронизации в многорезонаторном магнетроне при учете электроники магнетрона весьма сложно [4]. Однако рассмотрение простой эквивалентной схемы, отражающей основные автоколебательные свойства системы, может дать качественные результаты, описывающие все основные черты явлений в системе.

Большой практический интерес представляет синхронизация многорезонаторного магнетрона, работающего в непрерывном режиме, маломощным генератором СВЧ при действии внешней э. д. с. на магнетрон через нагрузочный вывод. Такой способ синхронизации возможен при применении ферритовых однонаправленных элементов. Существующие ферритовые вентили дают возможность создать схему, в которой практически не ослабляются мощности сигналов, идущих от синхронизируемого магнетрона в нагрузку и от воздействующего клистрона к магнетрону, но в 10^4 — 10^5 раз ослабляются мощности сигнала

лов, проходящих от магнетрона к клистрону и отраженных от нагрузки.

Эквивалентная схема магнетрона может быть представлена в виде параллельного контура с сосредоточенными параметрами L , C , проводимости G и подключенной параллельно контуру отрицательной нелинейной проводимости — $Y_e = g_e + ib_e$ (рис. 1). Такая эквивалентная схема может описывать процессы в системе, если магнетрон генерирует колебания одной частоты π -вида, то есть отсутствует вырождение колебаний. С контуром индуктивно связана двухпроводная линия, заменяющая в эквивалентной схеме волноводный тракт. На конце линии стоит в общем случае нагрузка Z ; в частном случае согласованной нагрузки $Z_0 = \rho$. Амплитуда внешней силы, действующей со стороны нагрузки, $E = E_0 \cos pt$. Рассмотрение такой весьма идеализированной эквивалентной схемы распределенной системы, естественно, может дать только качественное представление о поведении системы.

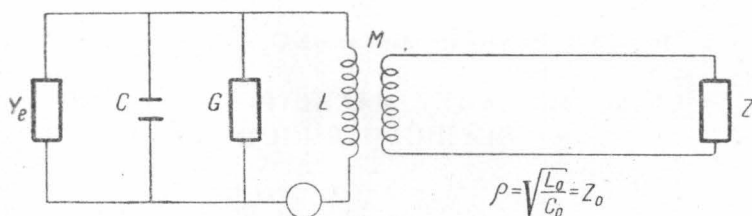


Рис. 1. Эквивалентная схема магнетрона

Проводя исследование для малых воздействующих э. д. с. вблизи частот синхронизации, мы ограничимся небольшими расстройками. При этом частота меняется в небольших пределах, и, следовательно, можно считать, что электронная проводимость не зависит от частоты колебаний. Как известно, реактивная часть электронной проводимости очень слабо зависит от амплитуды высокочастотного напряжения и имеет емкостной характер. Поэтому в первом приближении можно положить:

$$b_e = \omega_0 C_1 = \text{const.}$$

Зависимость активной составляющей электронной проводимости от амплитуды высокочастотного напряжения носит в общем случае нелинейный характер $g_e = g_e(v)$.

Полагая колебания в системе близкими к синусоидальным и пренебрегая запаздыванием в электронном промежутке, запишем уравнение для высококачественного напряжения v в контуре:

$$\left(1 - \frac{C_1}{C}\right) \ddot{v} + \frac{1}{C} (G - g_e - g'_e v) \dot{v} + \omega_0^2 v - M \omega_0^2 \frac{\partial I(0,t)}{\partial t} = \omega_0^2 E_0 \cos pt, \quad (1)$$

где $I(0, t)$ — ток на левом конце двухпроводной линии. Рассматривая телеграфные уравнения, описывающие процессы в двухпроводной линии, и учитывая граничные условия на концах линии

$$u(0,t) = \frac{M}{L} v, \quad u(l,t) = I(l,t) \cdot Z,$$

можно получить выражение для члена, характеризующего влияние внешней нагрузки в уравнении (1):

$$M\omega_0^2 \frac{\partial I(0,t)}{\partial t} = -\gamma^2\omega_0^2\rho \sin \varphi \cdot v - \gamma^2\omega_0\rho \cos \varphi \cdot \dot{v}, \quad (2)$$

где $\gamma^2 = \frac{M^2}{LL_0} k$ (k — волновое число), а ρ и φ определяются из условий отражения от нагрузки. При $Z = Z_0$ будет $\rho \cos \varphi = 1$ и $\rho \sin \varphi = 0$.

При расстройках, мало превышающих ширину полосы синхронизации, решение уравнения (1) можно записать в виде:

$$v = A \sin(pt - \psi),$$

полагая амплитуду и фазу медленно меняющимися за период. Тогда из уравнения (1) с учетом выражения (2) можно получить уравнения установления амплитуды и фазы:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2p} [A\omega \cdot F(A, \omega) - \gamma^2\omega_0\rho \cos \varphi \cdot Ap + \omega_0^2 E_0 \cos \psi], \quad (3)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{1}{2p} [(p^2 - \omega_0^2) - \frac{C_1}{C} p^2 - \gamma^2\omega_0^2\rho \sin \varphi - \omega_0^2 \frac{E_0}{A} \sin \psi],$$

где $F(A, \omega)$ — нелинейная функция, определяющая амплитуду автономных колебаний генератора при отсутствии внешней силы и влияния нагрузки. Так как возможные расстройки невелики, то можно считать $p/\omega \approx \omega_0/\omega \approx 1$, и частота колебаний автономной системы равна

$$\omega = \omega_0 + \frac{b_e}{2C} + \frac{1}{2} \gamma^2\omega_0\rho \sin \varphi.$$

Здесь член $b_e/2C$ характеризует электронное смещение частоты, а последний член определяет затягивание частоты нагрузкой. Учет запаздывания в электронном промежутке привел бы к появлению дополнительного члена в первом уравнении (3) и к наличию зависимости электронного смещения от запаздывания. Однако для малого времени запаздывания эти уравнения практически не отличаются от уравнений (3).

Рассмотрим уравнения системы в стационарном синхронном режиме при наличии на конце согласованной нагрузки Z_0 . Для приближенного выражения активной составляющей электронной проводимости воспользуемся кубической зависимостью, полученной из эксперимента [5]:

$$g_e = G + g_0 - \frac{4g_0 v^2}{3A_0^2},$$

где g_0 зависит от нагрузки, а A_0 — стационарная амплитуда автономных колебаний генератора при отсутствии влияния внешней нагрузки и запаздывания, то есть амплитуда, определяемая из условия $F(A, \omega) = 0$. При указанных предположениях уравнения стационарного режима имеют вид:

$$A^2 \frac{g_0}{2CA_0^2} - \frac{1}{2} \left(\frac{g_0}{C} - \gamma^2\omega_0 \right) = \frac{E_0\omega_0}{2A} \cos \psi, \quad (4)$$

$$\Delta = p - \omega = \frac{E_0\omega_0}{2A} \sin \psi.$$

Отсюда может быть получено выражение для амплитудной кривой внутри полосы синхронизации:

$$p - \omega = \pm \sqrt{\left(\frac{E_0 \omega_0}{2A}\right)^2 - \left[A^2 \frac{g_0}{2CA_0^2} - \left(\frac{1}{2} \frac{g_0}{C} - \gamma^2 \omega_0\right)\right]^2}. \quad (5)$$

Условия устойчивости найденных периодических решений имеют вид:

$$A^2 > \frac{1}{2} A_0^2 \left(1 - \frac{C}{g_0} \gamma^2 \omega_0\right) = \frac{1}{2} A_{ст}^2, \quad (6)$$

$$\frac{A_1^2}{\frac{1}{9} A_{ст}^4} + \frac{\Delta^2}{\frac{1}{12} \left(\frac{g_0}{C} - \gamma^2 \omega_0\right)^2} > 1, \quad A_1^2 = A^2 - \frac{2}{3} A_{ст}^2,$$

где $A_{ст}$ — стационарная амплитуда свободных автоколебаний при учете влияния нагрузки.

Из выражений (4) и (5) ясно, что амплитудные кривые исследуемой системы симметричны и аналогичны амплитудным кривым томсоновской системы, причем под расстройкой понимается разность частоты внешней силы и частоты колебаний генератора в автономном режиме (при наличии электронного смещения частоты). Условия устойчивости также аналогичны условиям устойчивости стационарных решений томсоновской системы.

Как следует из второго уравнения (4), относительная ширина полосы синхронизации может быть определена как

$$\Delta = \frac{2|p - \omega_0|}{\omega_0} = \frac{E_0}{A}. \quad (7)$$

§ 2

Экспериментально исследовалась синхронизация магнетрона непрерывного действия клистроном в сантиметровом диапазоне на установке, схема которой показана на рис. 2. Клистроном воздействовал на магнетрон через ферритовый вентиль, который пропускал сигнал от клистроном без ослабления, тогда как сигнал от магнетрона, идущий к клистроному, ослаблялся на 50 дБ. Синхронизованный сигнал от магнетрона, практически не ослабляясь, поступал через ферритовый вентиль в эквивалент антенны. Сигнал, отраженный от нагрузки, ослаблялся вентилем на 20 дБ, так что влияние нагрузки на колебания магнетрона было исключено. При синхронизации мощного генератора маломощным очень важно, чтобы синхронизируемый генератор работал на согласованную нагрузку, так как наличие большого по мощности отраженного сигнала приводит к ослаблению синхронизирующего действия.

Для проверки согласования магнетрона с волноводным трактом служила измерительная линия. Измерения показали, что коэффициент стоячей волны в тракте меньше 1,1.

Визуальное наблюдение спектрального состава колебаний и измерение частот производилось с помощью анализатора спектра. Для измерения соотношения мощностей клистроном и магнетрона в волноводный тракт вводилась петля связи с детекторной головкой, отградуированной по мощности. Измерение мощности клистроном производилось при погашенном магнетроне, а измерение мощности магнетрона — при

погашенном клистроне, хотя, вообще говоря, в большинстве экспериментов мощность клистрона была значительно меньше мощности магнетрона, и в синхронном режиме можно считать, что измеряется полная мощность магнетрона, идущая в нагрузку. Соотношение мощностей клистрона и магнетрона с помощью переменного аттенюатора менялось от 0,005 до 0,5.

Исследования показали, что синхронизация колебаний магнетрона имеет такой же характер, как и синхронизация томсоновского генератора на радиочастотах. При приближении частоты внешней силы к частоте π -колебаний магнетрона имеет место частичное увлечение

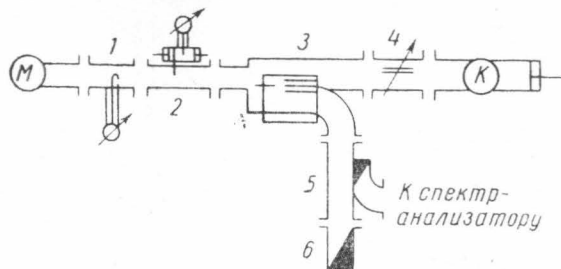


Рис. 2. Схема волноводного тракта: М — магнетрон, К — клистрон, 1 — петля связи с детекторной головкой, 2 — линия для измерения коэффициента стоячей волны в тракте, 3 — ферритовый вентиль, 4 — переменный аттенюатор, 5 — направленный ответвитель, 6 — эквивалент антенны

частоты магнетрона, возникают полигармонические биения, — на экране спектр-анализатора наблюдается ряд спектральных линий, расстояние между которыми зависит от расстройки между частотой внешней силы и частотой автономной системы. При уменьшении расстройки происходит захватывание колебаний магнетрона колебаниями клистрона. В пределе области синхронизации на экране спектр-анализатора отчетливо видно изменение частоты магнетрона при изменении частоты воздействия.

Эксперимент показал, что ширина полосы синхронизации возрастает при увеличении мощности воздействия и сужается при увеличении мощности синхронизируемого магнетрона. Так как измерения амплитуд колебаний (мощностей) производились в волноводном тракте, то формула (7) для проверки экспериментальных результатов может быть переписана в виде:

$$\Delta = \frac{2|p - \omega_0|}{\omega_0} = \frac{E_0}{A} = \gamma^2 \sqrt{\frac{W_K}{W_M}}, \quad (8)$$

где W_K и W_M — соответственно мощности клистрона и магнетрона, а γ^2 характеризует связь магнетрона с волноводным трактом. Порядок величины коэффициента γ^2 можно оценить, зная паспортную величину полосы затягивания магнетрона при известном отражении от нагрузки, из формулы

$$\Delta\omega = \frac{1}{4} \gamma^2 \omega_0 \left(\rho_0 - \frac{1}{\rho_0} \right), \quad (9)$$

где ρ_0 — коэффициент стоячей волны в волноводном тракте. В нашем случае γ^2 порядка 10^{-2} .

На рис. 3 показана зависимость полосы синхронизации от корня из отношения мощностей клистрона и магнетрона. Эта зависимость имеет линейный характер, что подтверждает выводы теории (формула (8)). На рис. 3 показаны три прямые для трех магнетронов. Так как

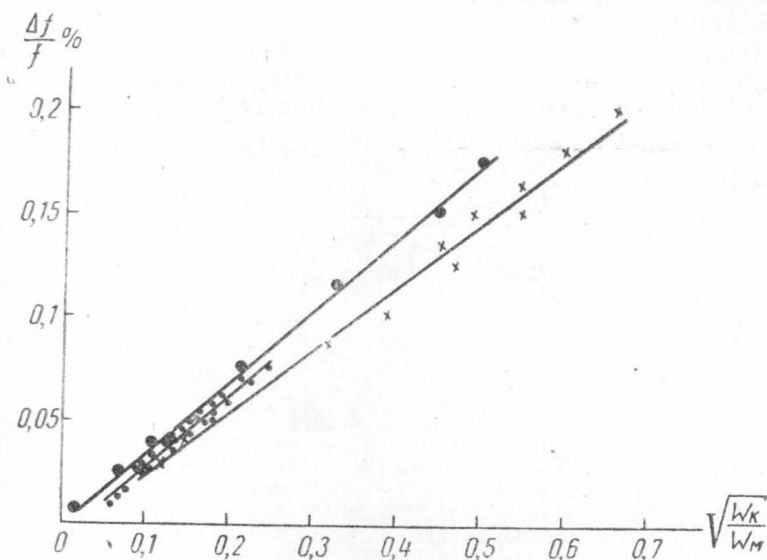


Рис. 3. Зависимость полосы синхронизации от соотношения мощностей для трех магнетронов

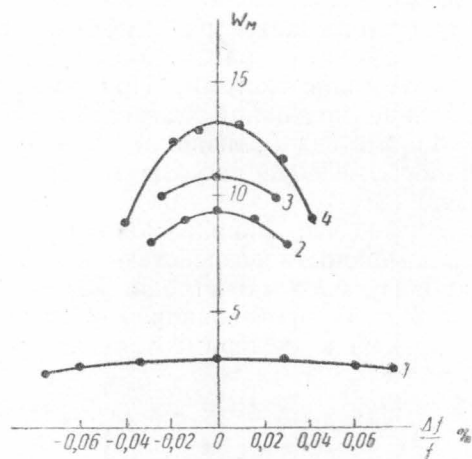


Рис. 4. Амплитудные кривые: 1, 2, 3 — для одного магнетрона, 4 — для другого

связь разных магнетронов с трактом не одинакова, то прямые имеют разные углы наклона. В данной схеме, при использовании нагрузочного вывода для воздействия на магнетрон, максимальная ширина относительной полосы захватывания составляла 0,2%. Путем дополнительных изменений в волноводном тракте представляется возможным расширить полосу синхронизации, однако исследование этого вопроса явится предметом отдельного сообщения.

Изменение амплитуды синхронизованных колебаний внутри поло-

сы захватывания качественно прослеживалось по спектр-анализатору. Количественные измерения проводились с помощью петли связи, помещенной в волноводный тракт. Амплитудные кривые при различных соотношениях мощности воздействия и мощности магнетрона приведены на рис. 4. Эти кривые носят резонансный характер с максимумом при равной нулю расстройке между частотой внешней силы и частотой автономной системы; таким образом, они имеют такой же вид, как и амплитудные кривые синхронизованных колебаний томсоновского генератора. Следовательно, в рассматриваемой схеме магнетрон при L -колебаниях ведет себя как система с оптимальным запаздыванием [6].

Из-за небольшой ширины полосы захватывания ряд качественных экспериментов был проведен в той же схеме при воздействии на клистрон (вместо магнетрона) в оптимальном режиме. Изучалась зависимость ширины полосы синхронизации от связи синхронизируемого генератора с волноводным трактом и от коэффициента стоячей волны. При сравнимых мощностях синхронизируемого и синхронизирующего клистронов и при оптимальной связи с трактом полоса захватывания получалась порядка 1%. С увеличением коэффициента стоячей волны и с уменьшением связи полоса синхронизации, как и следовало ожидать, резко уменьшалась.

Выводы

1. Эквивалентная схема, сильно упрощенная, отражает основные свойства рассматриваемой системы.
2. Магнетрон как автоколебательная система при синхронизации ведет себя аналогично томсоновскому генератору: амплитудные кривые имеют аналогичный вид, ширина полосы захватывания линейно зависит от соотношения амплитуд.
3. Применение ферритового вентиля позволяет осуществить синхронизацию более мощного генератора менее мощным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Donal J. S. *Advances in Electronics* 4, 187, 1952.
2. Kogos L. L. *Proc. I. R. E.*, 41, 4, 1953.
3. Spenser P. L. *Electronics*, 26, 148, 1953.
4. Бычков С. И. *Вопросы теории и практического применения многорезонаторных магнетронов*, 1958.
5. David E. E. *Proc. I. R. E.*, 40, 669, 1952.
6. Минакова И. И., Степанова Н. В. *Радиотехника и электроника*, 1, 805, 1956.

Поступила в редакцию
11.2 1959 г.

Кафедра колебаний