

# Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 1 — 1962

Б. П. БОЙКО, И. И. МИНАКОВА

## СИНХРОНИЗАЦИЯ КЛИСТРОНА СИГНАЛОМ, ДЕЙСТВУЮЩИМ СО СТОРОНЫ НАГРУЗКИ

При помощи эквивалентной схемы теоретически рассматривается изменение мощности, отдаваемой в нагрузку синхронизованным генератором, при подаче воздействующего внешнего сигнала через нагрузочный тракт.

Показано, что в таком случае мощность, идущая в нагрузку, уменьшается при увеличении амплитуды внешнего воздействия. Учтено влияние запаздывания в синхронизованном генераторе. Теоретические результаты подтверждены экспериментально на клистронном генераторе в диапазоне 3 см.

### Введение

В последние годы широко используется явление синхронизации генераторов в диапазоне УВЧ и СВЧ. Поведение генератора в непрерывном режиме внутри области синхронизации изучалось рядом авторов как теоретически, так и экспериментально [2, 3, 4]. В большинстве работ теоретическое рассмотрение проводилось для эквивалентной схемы генератора с синхронизирующим сигналом, действующим непосредственно в контуре. При этом предполагалось, что сопротивление источника внешнего сигнала включено в контур синхронизируемого генератора. Экспериментально исследована зависимость амплитуды колебаний в резонаторе синхронизируемого клистрона внутри области синхронизации. При подобном рассмотрении хорошо описывается явление синхронизации для длинноволновой части диапазона СВЧ, где обычно канал, по которому подается синхронизирующий сигнал, разделен с каналом, по которому стбируется мощность генератора. В коротковолновой части диапазона СВЧ практически большинство генераторов имеют один вывод, связывающий генератор с трактом. При синхронизации таких генераторов один и тот же канал используется как для передачи синхронизирующего сигнала, так и для отбора мощности. Следовательно, существенным является знание не амплитуды поля внутри резонатора генератора, а мощности, отдаваемой в нагрузку.

## Постановка задачи

Эквивалентная схема для задачи о синхронизации клистронного генератора при учете тракта представлена на рис. 1\*. При этом тракт представлен в виде эквивалентной длинной линии без потерь. Линия считается полубесконечной. Подключение длинной линии непосредственно в контур не принципиально, но зато упрощает выкладки и помогает получить наглядные результаты.

Для любой точки линии справедливы телеграфные уравнения:

$$\frac{\partial V}{\partial x} = -L_0 \frac{\partial I}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} = -C_0 \frac{\partial V}{\partial t}, \quad (2)$$

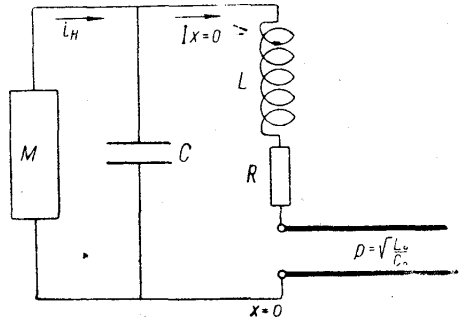


Рис. 1. Эквивалентная схема

$L_0$  — погонная индуктивность,  $C_0$  — погонная емкость. Граничные условия для линии в точке  $x=0$  получим из уравнений Кирхгофа для контура

$$I_{x=0} = i_n + C \frac{du}{dt}, \quad (3)$$

$$V_{x=0} = L \frac{dI_{x=0}}{dt} + RI_{x=0} + u, \quad (4)$$

$u$  — напряжение на емкости; остальные обозначения ясны из рис. 1.

Наведенный ток  $i_n$  нелинейно зависит от  $u$  и является малым по сравнению с емкостным током. Потери в контуре также считаем малыми. Отсюда следует, что волновое сопротивление линии  $\rho = \sqrt{L_0/C_0}$ , которое является активным, должно быть одного порядка малости с сопротивлением самого контура  $R$ .

Из теории длинных линий известно, что общее решение уравнений (1) и (2) имеет вид

$$V = f_1\left(t + \frac{x}{V_0}\right) + f_2\left(t - \frac{x}{V_0}\right), \quad (5)$$

$$I = \frac{f_1\left(t + \frac{x}{V_0}\right) - f_2\left(t - \frac{x}{V_0}\right)}{\rho}, \quad (6)$$

$$V_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}, \quad (7)$$

где  $f_1\left(t + \frac{x}{V_0}\right)$  и  $f_2\left(t - \frac{x}{V_0}\right)$  — произвольные дифференцируемые функции.

Физически  $f_1\left(t + \frac{x}{V_0}\right)$  описывает волну, идущую к генератору,  $f_2\left(t - \frac{x}{V_0}\right)$  — волну, идущую от генератора. Поэтому ясно, что в автономном режи-

\* Выбор клистрона не принципиален: важно, что он обладает всеми свойствами, существенными для СВЧ.

ме для эквивалентной схемы рис. 1 нужно считать  $f_1\left(t + \frac{x}{V_0}\right) = 0$ ; в неавтономном режиме  $f_1\left(t + \frac{x}{V_0}\right)$  является заданной.

Наша задача найти  $f_2\left(t - \frac{x}{V_0}\right)$  такую, чтобы решения (5) и (6) удовлетворяли граничным условиям (3) и (4). Поскольку граничные условия нелинейны, получить точное решение задачи очень трудно. Будем искать приближенное решение, используя квазилинейные методы нелинейной теории колебаний, и найдем  $f_2(t)$ . Если функция  $f_2(t)$  будет известна, то искомую функцию легко получить, заменив в  $f_2(t)$  время  $t$  на запаздывающее время  $t - \frac{x}{V_0}$ .

Подставим выражение (6) в граничное условие (3), отбросим  $\rho i_n$  как величину второго порядка малости и получим

$$f_2(t) = f_1(t) - \rho C \frac{du}{dt}. \quad (8)$$

Таким образом, для нахождения решения  $f_2(t)$  нужно определить функцию  $\frac{du}{dt}$ . Найдем эту функцию. Исключим  $V_{x=0}$  и  $I_{x=0}$  из уравнения (4), используя уравнение (3), соотношения (5) и (6); отбросим величины второго порядка малости и получим уравнение для напряжения на конденсаторе контура генератора.

$$\frac{d^2u}{dt^2} + 2\delta(1 + \beta) \frac{du}{dt} + \omega_0^2 u + \frac{1}{C} \frac{di_n}{dt} = 2\omega_0^2 f_1(t), \quad (9)$$

где

$$2\delta = \frac{R}{L}; \quad \beta = \frac{\rho}{R}; \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC}.$$

До сих пор никаких ограничений на вид функций  $i_n = i_n(u)$  не накладывалось, а использовалось только условие ее малости. Функция  $f_1(t)$  также могла иметь произвольный вид.

Таким образом, уравнение (9) описывает поведение некоторого генератора под действием произвольной внешней силы. В частном случае генератором может быть клистрон, а внешний сигнал является гармоническим. При частоте сигнала, близкой к  $\omega$ , уравнение (9) описывает явление синхронизации на основном тоне. Этот случай наиболее интересен, и поэтому рассмотрим его подробнее.

### Случай гармонического внешнего воздействия

Пусть

$$f_1\left(t + \frac{x}{V_0}\right) = a \sin p\left(t + \frac{x}{V_0}\right). \quad (10)$$

Подставим (10) при  $x=0$  в уравнение (9), которое в общепринятых обозначениях будет иметь вид

$$\frac{d^2y}{dt^2} + 2\delta(1 + \beta) \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y + \frac{x}{C} \frac{di_n}{dt} = \omega_0^2 E_0 \sin pt, \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} y &= \alpha u, \\ E_0 &= 2\alpha a, \end{aligned} \quad (12)$$

$\alpha$  — коэффициент, зависящий от электроники клистрона. Решение пишется в виде

$$y = A \sin(pt + \Phi). \quad (13)$$

Для наведенного тока используется известное разложение [4, 5]

$$i_n = i_0 - 2i_0 MJ_1(A) \cos \gamma \sin(pt + \Phi) + 2i_0 MJ_1(A) \sin \gamma \cos(pt + \Phi), \quad (14)$$

где  $\gamma$  — отклонение пролетного угла от оптимального, определяет запаздывание в клистроне.  $A$  и  $\Phi$  медленно меняющиеся функции времени, которые определяются из укороченных уравнений

$$\frac{dA}{dt} = -\delta A \left[ (1 + \beta) - \eta \cos \gamma \frac{J_1(A)}{A} + \frac{\omega_0^2 E_0}{2\delta \rho A} \sin \Phi \right], \quad (15)$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = -\delta \left[ \frac{p^2 - \omega_0^2}{2\delta \rho} + \eta \sin \gamma \frac{J_1(A)}{A} + \frac{\omega_0^2 E_0}{2\delta \rho A} \cos \Phi \right], \quad (16)$$

где

$$\eta = \frac{i_0 M \alpha}{c \delta}.$$

Отметим, что роль амплитуды «внешнего» сигнала играет удвоенная амплитуда падающей волны. В остальном ход решения уравнения (11) точно такой же, как в указанных выше работах [2, 3, 4]. Поэтому в дальнейших рассуждениях функции  $A(t)$  и  $\Phi(t)$  считаются известными.

Подставим (13) в уравнение (8), отбросим члены второго порядка малости и, проделав простые преобразования, получим

$$2\alpha f_2(t) = E_0 \sin pt - 2\rho \rho C A(t) \cos[pt + \Phi(t)] = B(t) \sin[pt + \psi(t)], \quad (17)$$

где  $B(t)$  и  $\psi(t)$  определяются уравнениями

$$B^2(t) = E_0^2 + 4\beta \frac{\delta^2 p^2}{\omega_0^4} \left[ \beta + \frac{\omega_0^2 E_0}{2\delta \rho A(t)} \sin \Phi(t) \right] A^2(t), \quad (18)$$

$$\operatorname{tg} \psi(t) = - \frac{\cos \Phi(t)}{\sin \Phi(t) + \frac{\omega_0^2 E_0}{4\delta \rho \beta A(t)}}. \quad (19)$$

Из (18) и (19) видно, что  $B(t)$  и  $\psi(t)$  также являются медленно меняющимися функциями своего аргумента. Если теперь в выражении (17) заменить  $t$  на  $t - \frac{x}{V_0}$ , то получим искомое решение.

### Стационарный случай

В стационарном случае  $\frac{dA}{dt} = \frac{d\Phi}{dt} = 0$ . Из (18) и (19)  $B^2 = \text{const}$ ,  $\psi = \text{const}$ . С помощью (15) и (16) можно исключить  $\Phi$  из уравнений (18) и (19). Проделав это для уравнения (18), получим уравнение, связы-

вающее амплитуду синхронизованных колебаний в контуре и амплитуду волны, идущей от генератора.

$$B^2 = E_0^2 - 4\beta \frac{\delta^2 p^2}{\omega_0^2} \left[ 1 - \eta \cos \gamma \frac{J_1(A)}{A} \right] A^2. \quad (20)$$

Уравнение (20) позволяет построить «амплитудную кривую» для  $B^2$ , т. е. зависимость  $B^2 = B^2(\Delta)$ , если известна  $A^2 = A^2(\Delta)$ , где  $\Delta$  — относительная расстройка между частотой внешнего сигнала и частотой системы. Зависимость  $A^2 = A^2(\Delta)$  легко получить, исключив фазу  $\Phi$  из (15) и (16):

$$\begin{aligned} \left[ (1 + \beta) - \eta \cos \gamma \frac{J_1(A)}{A} \right]^2 + \left[ \Delta - (1 + \beta) \operatorname{tg} \gamma + \eta \sin \gamma \frac{J_1(A)}{A} \right]^2 = \\ = \frac{\omega_0^4 E_0^2}{4 \delta^2 p^2 A^2}, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\text{где } \Delta = \frac{p^2 - \omega^2}{2\delta p}; \quad \omega^2 = \omega_0^2 - 2\delta\omega(1 + \beta) \operatorname{tg} \gamma.$$

Уравнение (21) — это уравнение амплитудной кривой для амплитуды в контуре, записанное в неявном виде.

Очевидно, что устойчивым значениям  $A$  совершенно однозначно соответствуют устойчивые значения  $B$ . Поэтому для нахождения устойчивости  $B$  используем уравнения устойчивости для  $A$

$$J_0(A) < \frac{2(1 + \beta)}{\eta \cos \gamma}, \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \left( \frac{p^2 - \omega_0^2}{2\delta p} \right)^2 + \eta \left[ \frac{p^2 - \omega_0^2}{2\delta p} \sin \gamma - (1 + \beta) \cos \gamma \right] J_0(A) + \\ + (1 + \beta)^2 + \eta^2 \frac{J_1(A)}{A} \left[ J_0(A) - \frac{J_1(A)}{A} \right] > 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Отметим некоторые свойства амплитудной кривой  $B^2 = B^2(\Delta)$ , которые можно получить, исследуя уравнения (20) и (21) стандартными способами (условия устойчивости не учитываются).

1.  $B^2 = B^2(\Delta)$  имеет максимум при расстройках  $\Delta = \Delta_*$ , которые находятся при совместном решении уравнения (21) и уравнения

$$J_0(A_*) = \frac{2}{\eta \cos \gamma}. \quad (24)$$

Уравнение (24) на плоскости  $A^2, \Delta$  представляет прямую, параллельную оси  $\Delta$ .

2.  $B^2 = B^2(\Delta)$  имеет экстремум при тех же значениях расстройки  $\Delta$ , при которых имеет экстремум  $A^2 = A^2(\Delta)$ .

3. Если  $A_{\max}^2$  «абсолютный максимум» функции  $A^2 = A^2(\Delta)$  при  $\Delta = \Delta_{\max}$  и  $A_{\max}^2 > A_*^2$ , то при  $\Delta = \Delta_{\max}$  функция  $B^2 = B^2(\Delta)$  имеет минимум. В частности, возможен случай, когда  $B^2 = 0$  при  $\Delta = \Delta_{\max}$ . Из уравнения (20) и (21) можно получить соотношения, связывающие параметры  $\beta, E_0, \gamma, \delta, \eta$ , при которых  $B^2 = 0$ .

4. Если  $A_{\max}^2 \leq A_*^2$ , то  $B^2 = B^2(\Delta)$  имеет при  $\Delta = \Delta_{\max}$  абсолютный максимум.

Эти свойства  $B^2 = B^2(\Delta)$  наглядно представлены на графиках рис. 2.

Графики получены численным расчетом. При этом функции Бесселя заменены первыми двумя членами разложения их в ряд Тейлора;  $\beta = 1$

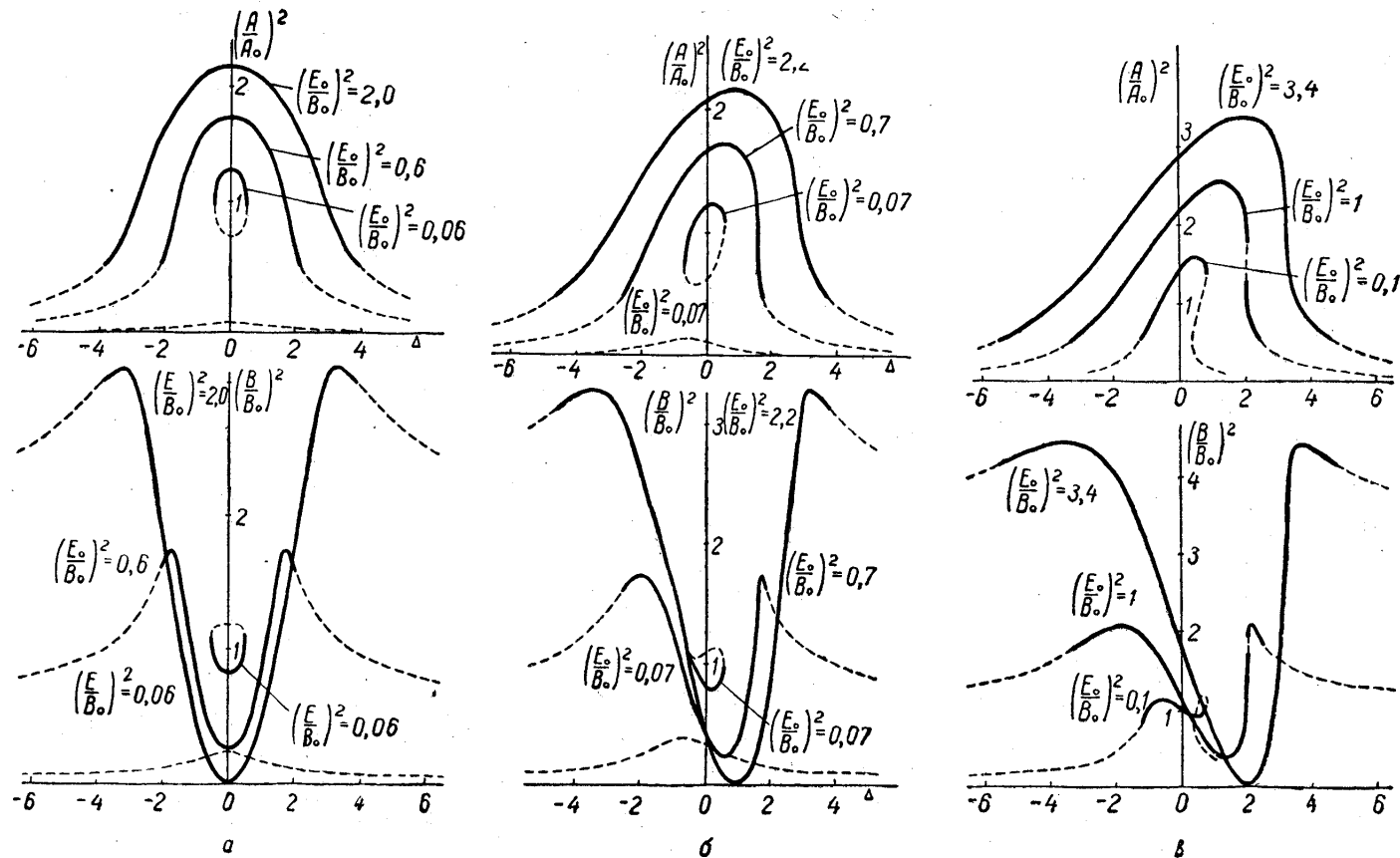


Рис. 2. Амплитудные кривые для синхронных режимов при разных внешних сигналах и фиксированном запаздывании: а)  $\gamma = 0$ ; б)  $\gamma = 25^\circ$ ; в)  $\gamma = 45^\circ$ . Сплошными линиями обозначены устойчивые значения амплитуд, пунктиром — неустойчивые

для всех кривых. Качественная картина явления при введении таких предложений конечно не изменится. По оси абсцисс отложена расстройка между частотой внешнего сигнала и частотой колебаний автономного генератора, по оси ординат — квадраты относительных амплитуд  $\left(\frac{A}{A_0}\right)^2$  и  $\left(\frac{B}{B_0}\right)^2$ , где  $A_0$  и  $B_0$  соответственно амплитуда в контуре генератора и амплитуда волны, идущей от генератора при отсутствии синхронизирующего сигнала. Величина и характер запаздывания определяется величиной и знаком  $\gamma$ . Графики 2, 3, 4 построены для трех значений  $\gamma \geq 0$ .

При  $\gamma < 0$  амплитудные кривые являются зеркальным отображением приведенных кривых относительно оси  $\Delta = 0$ . Параметром для каждого семейства кривых является величина внешнего сигнала.

Если запаздывание отсутствует (рис. 2,а), кривые симметричны относительно нулевой расстройки; график  $A^2 = A^2(\Delta)$  представляет обычные кривые захватывания для томсоновского генератора, а устойчивые части кривых  $B^2 = B^2(\Delta)$ , как правило, качественно имеют вид обращенных кривых  $A^2 = A^2(\Delta)$ . При наличии запаздывания кривые деформируются и тем больше, чем больше запаздывание. Но характер деформации для кривых  $A^2$  и  $B^2$  при больших  $\gamma$  начинается сильно различаться (рис. 2,б). Если кривые  $A^2$  только увеличивают свой наклон с ростом  $\gamma$ , то кривые  $B^2$  кроме увеличения наклона становятся более плавными вблизи одного из максимумов, т. е. там  $B^2$  медленно меняется с изменением расстройки. Этот максимум, соответствующий пологой части кривой  $A^2 = A^2(\Delta)$ , сдвигается к середине области синхронизации и поэтому бывает ярко выражен. В то же время вблизи второго максимума при небольших изменениях расстройки происходит существенное изменение  $B^2$ . При дальнейшем увеличении  $\gamma$  часть кривой  $B^2 = B^2(\Delta)$ , содержащая второй максимум, становится неустойчивой. Сравнивая семейства кривых при фиксированных  $\gamma$ , видим, что изменение амплитуды внешнего сигнала значительно влияет на вид кривых  $B^2 = B^2(\Delta)$ , чем на вид  $A^2 = A^2(\Delta)$ .

Кривые  $B^2 = B^2(\Delta)$ , как и кривые  $A^2 = A^2(\Delta)$ , отражают появление качественно новых свойств при синхронизации систем с запаздыванием, таких, как деформация кривых при изменении запаздывания, наличие гистерезиса и т. д., при этом вид кривых  $B^2 = B^2(\Delta)$  сильнее зависит от переменных параметров, чем вид  $A^2 = A^2(\Delta)$ .

Характерной особенностью кривой  $B^2 = B^2(\Delta)$  является то, что в некотором диапазоне расстроек в области синхронизации величина  $B^2$  меньше  $B_0^2$ , в то время как в этом же диапазоне  $A^2 > A_0^2$ . Отсюда следует, что в диапазоне расстроек, где мощность синхронизованного генератора максимальна, мощность, отдаваемая им в нагрузку, меньше мощности, отдаваемой в нагрузку в автономном режиме. Хотелось обратить внимание на то, что кривые  $B^2 = B^2(\Delta)$  на рис. 2,а качественно совпадают с графиками для квадрата модуля коэффициента отражения, если линия нагружена на резонансное сопротивление. Можно провести более глубокую аналогию, если формально заменить синхронизируемый генератор в стационарном режиме некоторым комплексным сопротивлением, активная составляющая которого может быть как положительной, так и отрицательной. Пользуясь обычной формулой для коэффициента отражения известной в теории длинных линий, можно получить зависимость квадрата модуля и фазы от частоты. Очевидно, что обращение в нуль коэффициента отражения соответствует случаю, когда эквивалентное сопротивление равно волновому. Расчет эквивалентной схемы сложен, так

как и активная, и реактивная составляющие эквивалентного комплексного сопротивления являются функциями параметров и генератора, и внешнего сигнала. Такой расчет был проведен и дал результаты, совпадающие в стационарном режиме с приведенной выше теорией.

### Экспериментальная часть

Исследование синхронизации через волноводный тракт системы с запаздыванием было проведено на клистронном генераторе. Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 3.

Исследуемый генератор-клистрон 1 типа К-29, имеет один вывод — штырь, погружаемый в отверстие в волноводном тракте. Через этот вывод внешний сигнал воздействует на генератор и этот же вывод служит для передачи в тракт мощности. Подстроечный поршень 3 устанавли-

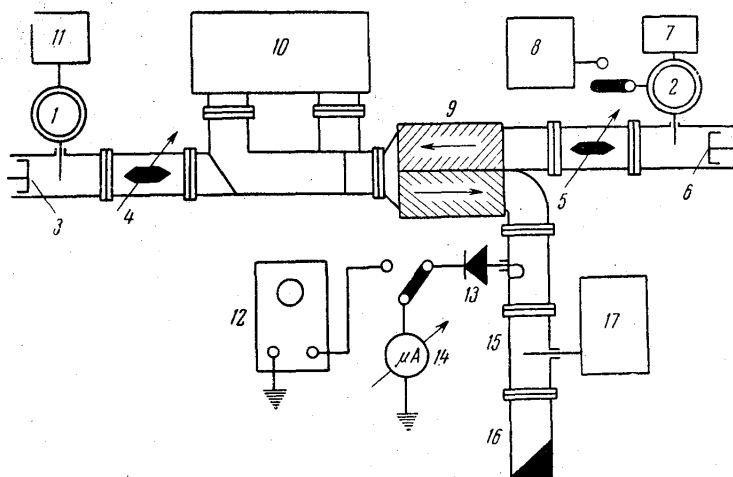


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки: 1 — синхронизируемый клистрон; 2 — клистрон-генератор внешнего сигнала; 3, 6 — настроечные поршни; 4, 5 — переменные аттенюаторы; 7, 11 — блоки питания клистронов; 8 — генератор пилообразного напряжения; 9 — циркулятор; 10 — рефлектометр 60-И; 12 — осциллограф; 13 — детекторная головка; 14 — микроамперметр; 15 — секция связи со спектр-анализатором; 16 — согласованная нагрузка; 17 — спектр-анализатор

вается так, чтобы расстояние между поршнем и возбуждающим штырем равнялось четверти длины волны в волноводе. Этим обеспечивается максимальное воздействие внешнего сигнала на синхронизируемый генератор. Клистрон 2, однотипный с клистроном 1, используется как генератор синхронизирующего сигнала. В схеме предусмотрена возможность модуляции частоты генератора.

Для устранения обратного действия клистрона 1 на клистрон 2 в тракт поставлен ферритовый циркулятор 9, дающий ослабление в прямом направлении — 1,2 дб, в обратном — 45 дб, ослабление отраженного от нагрузки сигнала — 25 дб. Наличие такой развязки разрешает исследовать захватывание клистроном 1 клистроном 2 при любом соотношении их мощностей.

Для проводимого эксперимента существенным было только отношение мощностей синхронизируемого генератора в автономном режиме и



внешнего сигнала. Поэтому абсолютные значения мощностей не измерялись, а проводилось измерение при помощи рефлектометра (типа 60-И) отношения мощностей сигналов, даваемых обоими генераторами в тракте. Используя аттенюаторы 4 и 5, можно измерить отдельно мощность клистрона 1 в автономном режиме и мощность синхронизирующего сигнала (в относительных единицах). Отношение этих мощностей измерялось с точностью 15%. В выходной части тракта расположены детекторная головка 13, ответвитель 15, спектр-анализатор 17 и согласованная нагрузка 16. Продетектированный сигнал мог подаваться на микроампер-

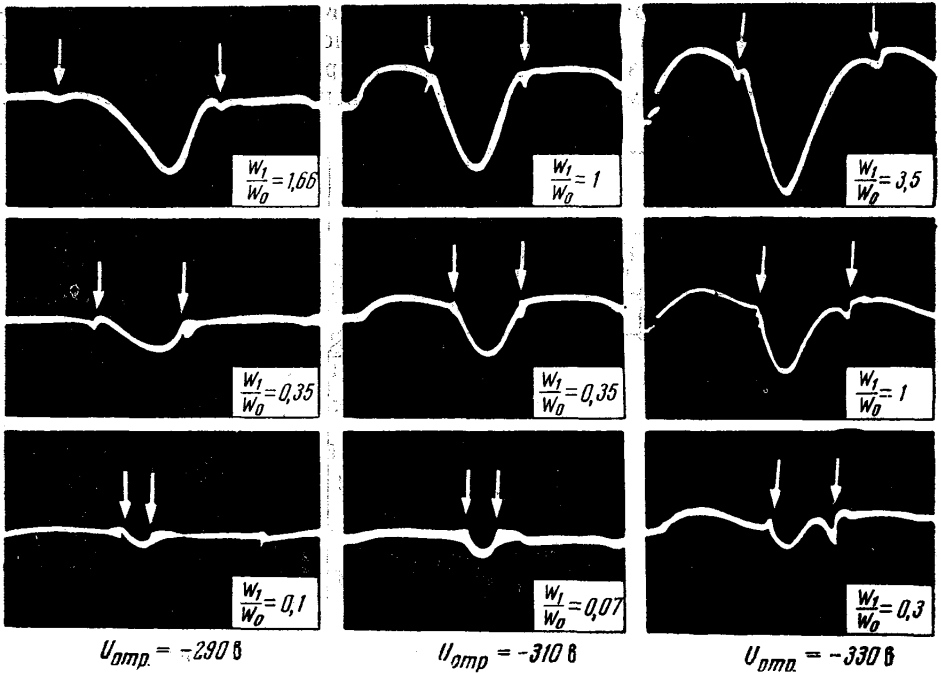


Рис. 4. Осциллограммы изменения мощности в волноводе в зависимости от соотношения мощностей и напряжения на отражателе

метр 14 при фиксированной частоте генератора, либо при наличии модуляции частоты на осциллограф 12.

Характеристика детектора 13 близка к квадратичной, т. е. можно считать, что показания прибора или отклонение луча осциллографа пропорциональны мощности, отдаваемой в нагрузку при синхронном режиме. С помощью спектр-анализатора 17 наблюдалась спектральная картина как в синхронном, так и в несинхронном режимах. Частота автоколебаний измерялась волномером спектр-анализатора с точностью до одного мегагерца.

Таким образом, собранная установка представляет возможность исследовать амплитудные кривые в тракте внутри области синхронизации. Исследование можно было проводить, измеряя для каждой расстройки и соотношения мощностей синхронизирующего и синхронизируемого генератора мощность, отдаваемую в нагрузку. Для качественного исследования формы кривых мощности с помощью осциллографа на отражатель клистрона 2 подавалось пилообразное напряжение с частотой 200 гц. Амплитуда пилы 50 в. Благодаря низкой частоте модулирующе-

го напряжения процессы возбуждения автоколебаний и процессы синхронизации можно было в любой момент времени считать установившимися.

Ширина области синхронизации при выбранных параметрах схемы уже полосы электронной перестройки по частоте клистрона 2. Поэтому практически во всех экспериментах можно считать, что амплитуда синхронизирующего сигнала в полосе частот, соответствующей области синхронизации, практически неизменна (изменение не превышает 20%). Меняя напряжение на отражателе клистрона 1, можно изменять запаздывание в синхронизируемом генераторе.

На рис. 4 приведены осциллограммы мощности, отдаваемой в тракт клистроном 1. На осциллограммах стрелками отмечены границы области синхронного режима. Как видно из осциллограмм, при оптимальном пролетном угле, когда клистрон может рассматриваться как система без запаздывания, форма амплитудной кривой не зависит от амплитуды внешнего сигнала, при изменении последней изменяется только ширина полосы синхронизации и глубина минимума мощности, идущей в нагрузку. При наличии запаздывания форма амплитудной кривой начинает зависеть как от запаздывания, так и от амплитуды внешнего сигнала. Приведенные на рис. 4 осциллограммы

дают хорошее качественное совпадение с теоретическими графиками рис. 2. Качественно форма амплитудной кривой, ее зависимость от параметров в синхронном режиме, хорошо видна на осциллограммах; однако оценить уровень полученной мощности относительно мощности в автономном режиме практически невозможно. Для более детальной проверки совпадения теории с экспериментом был снят ряд графиков амплитудных кривых по точкам. На рис. 5 приведены амплитудные кривые для случая отсутствия запаздывания и при большом запаздывании. На этих кривых отчетливо видно смещение максимумов и изменение формы кривых, связанное с запаздыванием. Следует отметить, что в большинстве случаев величина синхронизирующего внешнего сигнала сравнима по величине с сигналом от генератора в автономном режиме. Это вызвано тем, что для достаточно достоверного изучения формы амплитудных кривых необходимо иметь большую ширину полосы синхронизации.

### Заключение

Проведенное теоретическое и экспериментальное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. В синхронном режиме при синхронизации генератора через волно-

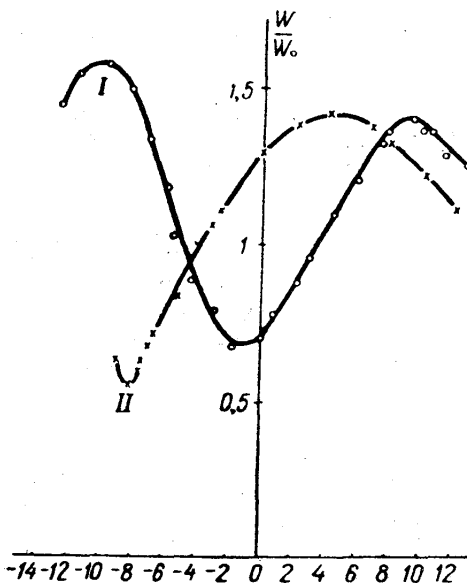


Рис. 5. Амплитудные кривые для синхронных режимов при  $\frac{\omega_1}{\omega_0} = 1$  и двух напряжений на отражателе: I —  $U_{отр} = -305$  в, II —  $U_{отр} = -335$  в

водный тракт, сужающий для отбора мощности в нагрузку, кривые зависимости от расстройки мощности в контуре (резонаторе) и в волноводном тракте для используемых в технике генераторов существенно различны: при максимальной мощности в резонаторе в волноводном тракте минимум, в большей части области синхронизации мощность в волноводном тракте меньше, чем в автономном режиме.

2. При наличии запаздывания в синхронизуемом генераторе форма кривых мощности в волноводном тракте гораздо сложнее, чем в резонаторе, так как зависит не только от величины запаздывания, но и от относительной величины внешнего сигнала.

3. При наличии запаздывания можно подобрать параметры системы таким образом, что в существенной части области синхронизации мощность в волноводе превышает или равна мощности в автономном режиме.

4. Для того чтобы мощность, отдаваемая в нагрузку, при синхронном режиме заметно превышала мощность в автономном режиме, необходимо иметь отдельный от тракта нагрузки тракт для подачи синхронизирующего сигнала на генератор.

Авторы приносят глубокую благодарность профессору К. Ф. Теодорчику за ценные замечания и интерес к работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Теодорчик К. Ф. Автоколебательные системы. ГИТТЛ, М.—Л., 1952.
2. Воробейчиков Э. С., Клементьев Ф. М. «Радиотехника и электроника», 1, № 3, 335, 1956.
3. Клементьев Ф. М. «Радиотехника и электроника», 1, № 9, 1284, 1956.
4. Минакова И. И., Степанова Н. В. «Радиотехника и электроника», 1, № 6, 1956.
5. Лопухин В. М. Возбуждение электромагнитных колебаний и волн электрическими потоками. ГИТТЛ, 1953.

Поступила в редакцию  
5. 4 1961 г.

Кафедра теории  
колебаний физического  
факультета