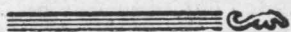


Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА



№ 5 — 1972



УДК 621.373.3

А. С. КОВАЛЕНКО

ПРОЦЕССЫ ВЗАИМНОЙ синхронизации томсоновских генераторов с различным характером ограничения амплитуд

В двух предельных случаях («мягкого» и «жесткого» ограничения амплитудных отклонений от равновесного значения) проведен расчет режимов взаимной синхронизации двух томсоновских генераторов, связанных реактивно. Расчет подтверждает определяющее влияние изменения эффективного затухания на течение процессов синхронизации.

Существенным параметром, определяющим поведение автоколебательной системы томсоновского типа, считается эффективное затухание — параметр, характеризующий скорость изменения энергии в системе. В работе [1], например, были введены понятия «жесткого» и «мягкого» ограничения амплитудных отклонений от стационарного значения. Характер ограничения амплитудных отклонений существенно сказывается на течение процессов вне области синхронизации, в то время как, независимо от характера ограничения, синхронный режим наступает в результате подавления автоколебаний, т. е. когда эффективное затухание на частоте собственных колебаний положительно.

В качестве простейшего примера при изучении процессов синхронизации в системах с различным характером ограничения амплитудных отклонений рассматривался [1, 2] случай, когда источником внешнего воздействия был идеальный генератор синусоидальной э. д. с. и обратным влиянием синхронизируемого генератора на источник можно было пренебречь (связь «направленная»). Вместе с тем основные черты процесса синхронизации подобных систем должны иметь общий характер, независимо от способа задания внешнего синусоидального воздействия. Поэтому представляет интерес изучение процессов взаимной синхронизации, когда обратное влияние синхронизируемого генератора ухудшает условие поддержания колебаний в связанном с ним генераторе, сказываясь тем самым на основных характеристиках процесса.

Теория взаимной синхронизации томсоновских генераторов при слабой связи между ними, пригодная для описания этого явления в достаточно широкой области расстроек и значений связи, разработана К. Ф. Теодорчиком [3]; она развита и подтверждена экспериментально Н. И. Есафовым [4]; Г. Н. Рапопорт [5] показал, что в случае выполнения условий «квазидентичности» связанных генераторов в системе

возможно установление «симметричных» режимов; смена областей «синфазной» и «противофазной» синхронизации сопровождается скачком частот, амплитуд и фаз синхронных колебаний (учет затухания в связи указывает на несимметрию областей синфазной и противофазной синхронизации). Эти общие результаты были подтверждены расчетом и экспериментально для случая «весьма слабой» связи между взаимодействующими генераторами [5, 6, 7]. Обычно вводимое условие малости связи позволяет применить для анализа системы метод, развитый Р. В. Хохловым [8].

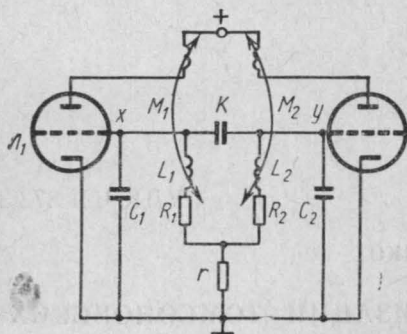


Рис. 1. Принципиальная схема исследуемой системы

В настоящей работе (исходя из общего представления о механизме синхронизации томсоновских генераторов [1]) исследуются процессы установления синхронного режима в системе двух связанных генераторов томсоновского типа в зависимости от характера ограничения амплитудных отклонений. Основное внимание при этом уделено анализу процессов вблизи полосы синхронизации (режимов биений), поскольку именно такой анализ дает наиболее полное представление о роли эффективного затухания в процессах синхронизации.

Запишем в безразмерном виде укороченные уравнения, к которым при известных ограничениях метода медленно меняющихся амплитуд сводится задача о взаимной синхронизации двух генераторов томсоновского типа при слабой связи между ними (рис. 1):

$$\dot{A} = \theta_1(A) A + \alpha_1 B \sin \Phi - \beta_1 B \cos \Phi, \quad (a)$$

$$\dot{B} = \theta_2(B) B - \alpha_2 A \sin \Phi - \beta_2 A \cos \Phi, \quad (б)$$

$$\dot{\Phi} = \xi_1 - \alpha_1 \frac{B}{A} \cos \Phi - \beta_1 \frac{B}{A} \sin \Phi, \quad (в) \quad (1)$$

$$\dot{\Psi} = \xi_2 - \alpha_2 \frac{A}{B} \cos \Phi + \beta_2 \frac{A}{B} \sin \Phi, \quad (г)$$

$$\dot{\Phi} = -\Delta + \left(\alpha_1 \frac{B}{A} - \alpha_2 \frac{A}{B} \right) \cos \Phi + \left(\beta_1 \frac{B}{A} + \beta_2 \frac{A}{B} \right) \sin \Phi. \quad (д)$$

Здесь $\theta_{1,2}$ — эффективные затухания генераторов, $\alpha_{1,2}$ — коэффициенты реактивной (емкостной) связи, $\beta_{1,2}$ — коэффициенты гальванической связи (считаем затухание в связи малым),

$$\beta_{1,2} \ll \alpha_{1,2};$$

$$2\xi_1 = 1 - \frac{v_1^2}{\omega^2}, \quad 2\xi_2 = 1 - \frac{v_2^2}{\omega^2},$$

$v_{1,2}$ — парциальные частоты соответственно генераторов A и B , $\omega \sim v_1 \sim v_2$, ω — «синхронная» частота; дифференцирование проводится по времени $\tau = \omega t$. Искомые колебания x и y в каждом из генераторов

имеют приближенно синусоидальную форму $x = A \sin(\tau - \varphi)$, $y = B \sin(\tau - \psi)$. Амплитуды свободных автоколебаний определяются условием энергетического баланса для каждого из генераторов $\Theta_1(A_0) = 0$; $\Theta_2(B_0) = 0$; $\Phi = \psi - \varphi$ — разность фаз колебаний x и y ; $\Delta = \frac{\nu_2 - \nu_1}{\omega}$ — расстройка парциальных частот.

В общем случае связь между генераторами не симметрична, $\alpha_2 = s\alpha_1$; s — коэффициент «направленности» связи ($s=0$ — связь «направленная» и $s=1$ — связь «симметричная»). Очевидно, вследствие несимметрии связи система стимулирует установление режима с частотой, близкой к ν_2 , если $s < 1$ (или ν_1 , если $s > 1$). Ограничиваясь этим замечанием, будем считать в дальнейшем, что $s \leq 1$, $s \sim 1$.

При достаточно большой расстройке парциальных частот каждый из генераторов (например, генератор B) возбуждает в другом генераторе (A) вынужденные колебания, амплитуда которых растет с уменьшением расстройки. По этой причине условия поддержания автоколебаний в генераторе A с уменьшением расстройки ухудшаются. Обратное влияние генератора A на генератор B определяет аналогичный процесс ухудшения условий поддержания автоколебаний в генераторе B , что приводит к уменьшению (при данной расстройке) интенсивности вынужденных колебаний в генераторе A и, следовательно, к уменьшению полосы синхронизации.

Пренебрегая малым временем установления малых отклонений, для систем с жестким ограничением амплитудных отклонений получаем в первом приближении (см. [2]).

$$\dot{a} = \left. \frac{\partial \Theta}{\partial A} \right|_{A_0} A_0 a + \alpha_1 B_0 \sin \Phi, \quad (a)$$

$$\dot{b} = \left. \frac{\partial \Theta_2}{\partial B} \right|_{B_0} B_0 b - s\alpha_1 A_0 \sin \Phi, \quad (б)$$

$$\dot{\varphi} = \xi_1 - \alpha_1 \frac{B_0}{A_0} \cos \Phi, \quad (в) \quad (2)$$

$$\dot{\psi} = \xi_2 - s\alpha_1 \frac{A_0}{B_0} \cos \Phi, \quad (г)$$

$$\dot{\Phi} = -\Delta + \left(\alpha_1 \frac{B_0}{A_0} - s\alpha_1 \frac{A_0}{B_0} \right) \cos \Phi. \quad (д)$$

Если мощности генераторов существенно различны

$$\left(\frac{\alpha_1 B_0}{A_0} \gg \frac{s\alpha_1 A_0}{B_0}, \quad \frac{n}{s} \gg 1 \right), \text{ все уравнения системы (2) одного порядка.}$$

Уравнение (2, д) легко интегрируется и для интересующих нас расстроек $(|\Delta| \geq \frac{\alpha_1 B_0}{A_0})$ получаем $\Phi = \Phi(\tau)$. Фазы $\varphi = \varphi(\tau)$ и $\psi = \psi(\tau)$ находим затем путем интегрирования уравнений (2, в, г). Пренебрегая малыми добавками a и b к амплитудам колебаний ($A = A_0 + a$, $B = B_0 + b$), представим решение в виде $x = A_0 \sin[\tau - \varphi(\tau)]$, $y = B_0 \sin[\tau - \psi(\tau)]$ и, раскладывая в области биений колебания x и y в ряд Фурье по частотам $(1 \pm k\Omega)$, находим амплитуды и частоты спектральных составляющих колебаний.

Результаты расчетов для $n=1$ ($s=0$), $n=2$ и $n=1,5$ ($s=1$) приведены на рис. 2 и 3.

На рис. 2 $\xi_1 = \frac{\omega_k - \nu_1}{\nu_2}$, $\Delta = \frac{\nu_2 - \nu_1}{\nu_2}$, $\alpha_1 = \text{const}$; $s = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}$ — коэффициент направленности связи (1 и 2 — частоты спектральных составляющих колебаний в области биений, которые при достаточно большой расстройке близки к ν_1 и ν_2 — парциальным частотам генераторов А и В).

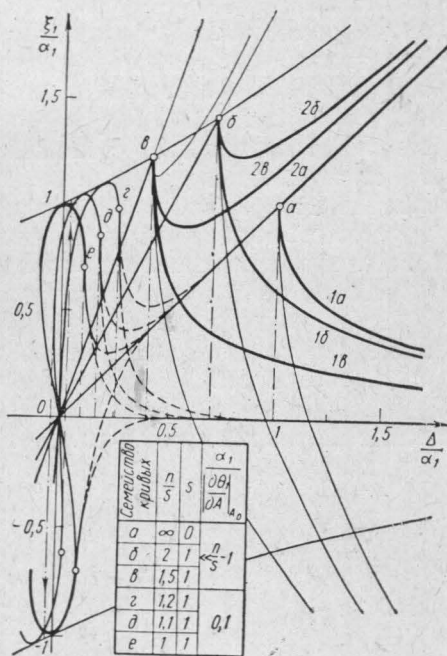


Рис. 2. Зависимость расстройки частот спектральных составляющих колебаний x и y от парциальных частот взаимодействующих генераторов при жестком ограничении амплитудных отклонений

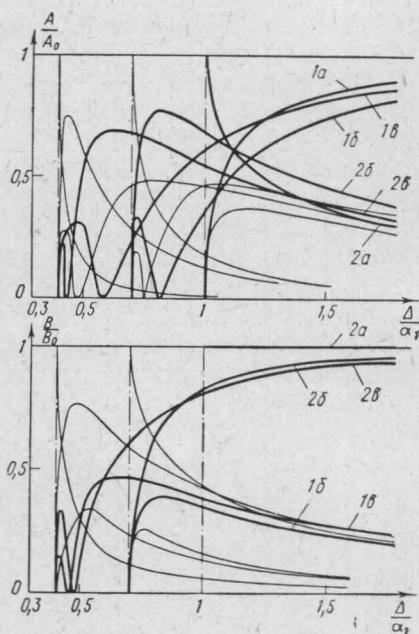


Рис. 3. Зависимость амплитуд спектральных составляющих колебаний от расстройки парциальных частот в области биений при жестком ограничении амплитудных отклонений. Обозначения те же, что на рис. 2

Как видим, результаты расчетов хорошо согласуются с исходными качественными представлениями. При достаточно большой расстройке колебания в каждом из генераторов происходят на частотах, близких к парциальным. (В соответствующей консервативной системе собственные частоты были бы определены графиком Вина. В рассматриваемом случае эффективное затухание приводит к сближению нормальных частот с парциальными.) С уменьшением расстройки, одновременно с уменьшением амплитуды автоколебаний¹ менее мощного генератора А (рис. 3, кривые 1а, 1б и 1в) происходит уменьшение амплитуды автоколебаний и более мощного генератора В тем большее, чем ближе мощности генераторов (кривые 2а, 2б и 2в). Полоса синхронизации при сближении мощностей взаимодействующих генераторов су-

¹ В рассматриваемом случае об автоколебаниях как о конкретной спектральной составляющей суммарного колебания x (или y) имеет смысл говорить лишь для достаточно больших по сравнению с полосой синхронизации расстроек.

жается. На границе полосы амплитуда установившихся синхронных колебаний равна (в каждом из генераторов) амплитуде свободных автоколебаний, эффективное затухание равно нулю, поэтому установившаяся синхронная частота соответствует графику Вина для конкретных коэффициентов связи (на рис. 2 график Вина построен для $s=1$).

Рассмотрим случай «квазиидентичных» генераторов ($\frac{n}{s} \approx 1$, $\frac{a_1 B_0}{A_0} \approx \frac{s a_1 A_0}{B_0}$). Режим взаимной синхронизации наступает при таких расстройках, когда малое различие в «вынуждающих» членах $\lambda_1 = \frac{a_1 B}{A}$ и $\lambda_2 = \frac{s a_1 A}{B}$ определяет значительное различие в интенсивностях вынужденных колебаний в каждом из генераторов. Поэтому если $\lambda_1 = \lambda_2 + \lambda$, режим синхронизации наступает при расстройках $|\Delta| \sim \lambda$.

Различие в «вынуждающих» членах определяется как исходной «неидентичностью» генераторов, так и различными случайными обстоятельствами (начальными условиями, случайными возмущениями), которые могут изменить амплитуды колебаний в каждом из генераторов. Отсюда следует, что чем жестче ограничены амплитудные отклонения, тем для более близких по мощности генераторов полоса синхронизации определяется «исходной неидентичностью» ($|\Delta_{\text{гр}}| \approx \lambda$); с другой стороны, при значительном сближении мощностей ($\lambda \rightarrow 0$) мы в конце концов приходим к случаю, когда малые отклонения амплитуд, возможные в любой реальной системе, окажутся достаточными для установления (при соответственно малой расстройке) синхронного режима.

Далее, в случае «квазиидентичных» генераторов вблизи синхронизма парциальных частот отклонения амплитуд колебаний от равновесных значений в каждом из генераторов малы сами по себе, независимо от характера ограничения амплитуд¹. Эффективное затухание, оставаясь малым для действующих отклонений амплитуд, все в меньшей степени, по мере сближения мощностей генераторов, сказывается на форме процессов установления; распределение синхронных частот приближается к графику Вина, в системе наблюдается явление затягивания частоты и прочее. Вместе с тем учет малого затухания предопределяет отклонение синхронных частот от графика Вина в сторону сближения с парциальными.

Обращаясь к системе уравнения (2), замечаем, что в случае квазиидентичных генераторов и ограниченной «жесткости» системы $\left(\frac{a_1}{\left| \frac{\partial \theta_1}{\partial A} \right|_{A_0}} \sim \frac{a_2}{\left| \frac{\partial \theta_2}{\partial B} \right|_{B_0}} \sim \alpha_{1,2} \right)$ — скорость изменения фазы Φ при

расстройках порядка полосы синхронизации) $|\Delta| \sim \lambda \ll \lambda_1 \approx \lambda_2$ значительно меньше скорости изменения амплитуд a и b . Следовательно, для каждого конкретного значения медленно меняющейся фазы Φ успевают устанавливаться соответствующие значения амплитуд колебаний — амплитуды A и B «квазистационарно» следуют за фазой Φ .

$$A = A_0 + \frac{a_1 B_0}{\left| \frac{\partial \theta_1}{\partial A} \right|_{A_0}} \sin \Phi; \quad B = B_0 - \frac{s a_1 A_0}{\left| \frac{\partial \theta_2}{\partial B} \right|_{B_0}} \sin \Phi, \quad (3)$$

¹ См. ниже анализ систем с мягким ограничением амплитуд.

Принимая во внимание, что уравнения (2) получены при условии $a \ll A_0$, $b \ll B_0$, которое по-прежнему выполняется, оставляем эти уравнения без изменения и присоединяем к ним фазовое уравнение (1, ∂), в котором учитываем соотношения (3). Полученная система уравнений интегрируется. Представляя искомые колебания в виде $x = A_0 \sin[\tau - \varphi(\tau)]$, $y = B_0 \sin[\tau - \psi(\tau)]$, разлагаем эти колебания в ряд Фурье и находим частоты и амплитуды спектральных составляющих колебаний x и y в области биений, а также амплитуды и частоты синхронных колебаний. Результаты расчетов случая

$$\beta_{1,2} = 0, \quad s = 1, \quad \frac{\alpha}{\left| \frac{\partial \theta_1}{\partial A} \right|_{A_0}} = \alpha_1 = 0,1, \quad \left| \frac{\partial \theta_1}{\partial A} \right|_{A_0} = \left| \frac{\partial \theta_2}{\partial B} \right|_{B_0}$$

приведены на рис. 2 (кривые g , d , e), показывающем хорошее соответствие результатов расчета с качественными представлениями о течении процессов.

В системах с мягким ограничением амплитуд отклонения амплитуд колебаний от равновесных значений ограничены слабо и могут быть большими. Поэтому имеет важное значение вид нелинейной зависимости $\theta_{1,2}$ при изменении амплитуд колебаний в значительных пределах, в отличие от случая жесткого ограничения амплитуд, когда нас интересует поведение эффективных затуханий лишь в окрестности весьма малых отклонений амплитуды от равновесного значения. Аппроксимируем эффективные затухания квадратичными двухчленами $\theta_1(A) = V_{01} \left[1 - \right.$

$$\left. - \left(\frac{A}{A_0} \right)^2 \right] \text{ и } \theta_2(B) = MV_{01} \left[1 - \left(\frac{B}{B_0} \right)^2 \right]; \text{ по-прежнему } n = \frac{B_0^2}{A_0^2}.$$

Поскольку эффективные затухания (по крайней мере для расстройек порядка полосы синхронизации, которыми мы, прежде всего, и интересуемся) малы ($|\theta_1| \sim \varepsilon \alpha_1$; $|\theta_2| \sim \varepsilon \alpha_2$, $\varepsilon \ll 1$), форма биений близка к синусоидальной, т. е. колебания x и y в каждом из генераторов в рассматриваемой области расстройек представим в виде суммы двух синусоидальных колебаний, амплитуды которых меняются медленно, оставаясь практически постоянными в течение времени $\tau^* \sim T_\Omega = \frac{2\pi}{(\Omega)}$,

($|\Omega|$ — частота биений вне области синхронного режима). Действительно, в нулевом приближении, полагая в (1) $\theta_{1,2} = 0$, получаем консервативную систему. Колебания x и y в каждом из генераторов есть суперпозиция двух колебаний, частоты которых соответствуют графику Винна, $x = A_1 \sin(\tau - \varphi_1) + A_2 \sin(\tau - \Omega\tau - \varphi_2)$; $y = B_1 \sin(\tau - \psi_1) + B_2 \sin(\tau - \Omega\tau - \psi_2)$. В первом приближении, проводя согласно [2] дополнительное усреднение эффективных затуханий по частоте биений, получаем выражения для амплитуд спектральных составляющих A_1 , A_2 , B_1 и B_2

$$\left(\frac{A_1}{A_0} \right)^2 = \frac{\xi_2}{\xi_1} \frac{n}{s} \left(\frac{B_1}{B_0} \right)^2 = \frac{1 + \frac{\xi_1}{\xi_2} M - 2 \left(1 + s \frac{M}{n} \right) \left(\frac{A_2}{A_0} \right)^2 - \frac{1}{\xi_2} (\alpha_2 \beta_1 + \alpha_1 \beta_2)}{1 + \left(\frac{\xi_1}{\xi_2} \right)^2 s \frac{M}{n}}.$$

(a)

(4)

$$\left(\frac{A_2}{A_0}\right)^2 = \frac{\xi_1}{\xi_2} \frac{n}{s} \left(\frac{B_2}{B_0}\right)^2 = \frac{1 + \frac{\xi_2}{\xi_1} M - 2 \left(1 + s \frac{M}{n}\right) \left(\frac{A_1}{A_0}\right)^2 + \frac{1}{\xi_2} (\alpha_2 \beta_1 + \alpha_1 \beta_2)}{1 + \left(\frac{\xi_2}{\xi_1}\right)^2 s \frac{M}{n}}. \quad (6)$$

Синхронный режим ($A_2=0$) наступает, как следует из (4, 6), когда¹

$$2 \left(\frac{A_1}{A_0}\right)^2 \geq \frac{1 + \frac{\xi_2}{\xi_1} M}{1 + s \frac{M}{n}}. \quad (5a)$$

Внутри полосы синхронизации амплитуда A_1 определяется выражением

$$\left(\frac{A_1}{A_0}\right)^2 = \frac{1 + \frac{\xi_1}{\xi_2} M}{1 + \left(\frac{\xi_1}{\xi_2}\right)^2 s \frac{M}{n}}. \quad (5б)$$

Объединяя (5, а) и (5, б), получаем неравенство, которое определяет полосу синхронизации.

Синхронные колебания, устанавливающиеся в системе, либо синфазны, либо противофазны в зависимости от того, большая или меньшая из возможных частот системы устанавливается (поправка к частотам и фазам колебаний в первом приближении равна нулю, т. е. распределение частот соответствует графику Вина). Для противофазного режима $\xi_1 < 0$, $\xi_2 < 0$, для синфазного $\xi_1 > 0$, $\xi_2 > 0$. Очевидно, в первом случае амплитуда A_1 несколько больше амплитуды A_2 , что является следствием затухания в связи $\beta_{1,2} \neq 0$. Другими словами, затухание в связи стимулирует установление противофазного режима (либо синфазного — в зависимости от конкретного способа осуществления гальванической связи).

В случае мягкого ограничения амплитуд, основные количественные характеристики процесса определяются не только соотношением мощностей и коэффициентом направленности связи, но и формой зависимости эффективного затухания от амплитуды (в данном случае, случае квадратичной аппроксимации затуханий, — величиной M).

Амплитуды спектральных составляющих x и y , рассчитанные для случаев ($s=1$; $M=n$; $n=1, 2, 10$), приведены на рис. 4. При уменьшении соотношения мощностей взаимодействующих генераторов ($n \geq 1$) полоса синхронизации уменьшается, однако в отличие от случая жесткого ограничения имеет величину порядка связи даже в случае полной идентичности генераторов (см. также рис. 5). Это естественный результат предположения о мягком ограничении амплитудных отклонений, когда эффективное затухание для действующих отклонений амплитуд мало и им можно пренебречь при определении частот и фаз синхронных колебаний.

Проведенный расчет в «квазиконсервативном» приближении безусловно справедлив для расстройк порядка полосы синхронизации, когда действующие отклонения амплитуд в каждом из генераторов достаточно малы. Внутри полосы синхронизации, при уменьшении расстройки

¹ Малым затуханием в связи $\beta_{1,2} \ll |\theta_{1,2}|$ пренебрегаем.

парциальных частот пренебрежение эффективным затуханием не всегда возможно. Очевидно, в случае «квазиидентичных» генераторов (что следует и из формулы (5,6)) амплитуда синхронных колебаний в каждом из генераторов незначительно отличается от амплитуды свободных автоколебаний. Следовательно, эффективное затухание для любых расстроек внутри полосы синхронизации остается малым, поэтому как син-

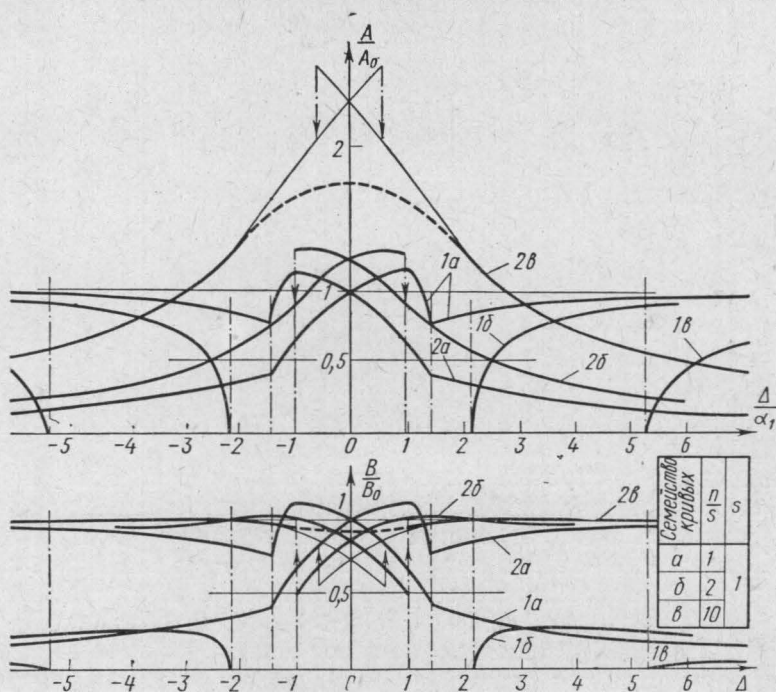


Рис. 4. Зависимость амплитуд спектральных составляющих колебаний (в области биений) и амплитуд установившихся синхронных колебаний (внутри полосы синхронизации) от расстройки парциальных частот генераторов A и B при мягком ограничении амплитудных отклонений. Обозначения те же, что на рис. 2 и 3

хронные частоты и фазы, так и амплитуды колебаний для любых расстроек можно рассчитывать по формулам «квазиконсервативного» приближения. В случае генераторов, далеких по мощности, а также в случае направленной связи, амплитуды колебаний внутри полосы синхронизации значительно отклоняются от амплитуд свободных автоколебаний. В этом случае следует учесть влияние эффективного затухания, которое обеспечивает ограничение амплитуд колебаний и, с другой стороны, приводит к сближению нормальных частот с парциальными.

В полном соответствии с исходным представлением о механизме синхронизации томсоновских систем изменение эффективного затухания играет существенную роль в процессах взаимной синхронизации.

При изменении характера ограничения амплитуд от «жесткого» до «мягкого» эффективное затухание для действующих отклонений амплитуд уменьшается. Поэтому, чем жестче ограничены амплитудные отклонения и чем больше, с другой стороны, «действующие» отклонения амплитуд, тем в большей мере сказывается эффективное затухание на характере переходного процесса, тем в большей степени искажается

форма биений, тем сложнее спектральный состав колебаний (вне полосы синхронизации).

Установившаяся синхронная частота (в случае реактивной связи между генераторами) расположена между парциальной частотой более мощного генератора и нормальной частотой соответствующей консервативной системы. Отклонение синхронной частоты от графика Вина определяется величиной эффективного затухания для установившегося значения амплитуд синхронных колебаний (в полном соответствии с теорией слабодиссипативных линейных систем).

Полоса синхронизации независимо от характера ограничения амплитуд уменьшается по мере сближения мощностей взаимодействующих генераторов. Однако для квазиидентичных генераторов, ограничивающих амплитудные отклонения мягко, полоса синхронизации остается пропорциональной величине связи вплоть до полного совпадения мощностей генераторов, в то время как для «жестких» генераторов полоса синхронизации уменьшается более существенно и минимальное ее значение в случае идентичных генераторов тем меньше, чем жестче ограничены отклонения амплитуд¹. В конкретном случае, рассчитанном в настоящей работе, полоса синхронизации идентичных генераторов пропорциональна квадрату коэффициента связи. К аналогичному выводу приходит Г. Н. Рапопорт в работе [9], в которой автор анализирует зависимость ширины полосы синхронизации от величины связи для идентичных генераторов и в случае, когда приближение «слабой связи» непригодно, проводит расчет численно для конкретного соотношения параметров схемы.

В релаксационных генераторах синхронный режим наступает в результате захватывания частоты, поэтому синхронная частота всегда находится между парциальными частотами генераторов и в случае квазиидентичных связанных генераторов расширяется существенно по сравнению со случаем направленной связи. Расширение полосы есть результат взаимного подтягивания частот автоколебаний релаксационных генераторов.

В системах томсоновского типа независимо от характера ограничения амплитуд синхронный режим наступает в результате подавления автоколебаний менее мощного генератора, либо, в случае квазиидентичных генераторов, условия подавления определяются вблизи синхронизма парциальных частот случайными обстоятельствами.

В заключение благодарю В. В. Мигулина за постоянное внимание к работе и ценные замечания.

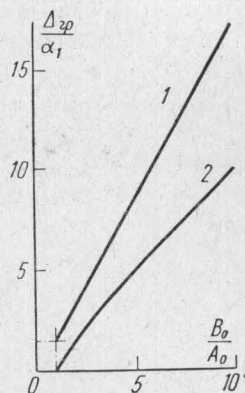


Рис. 5. Зависимость полосы синхронизации $\Delta_{гр}$ от соотношения мощностей генераторов ($s=1$). Системы с мягким ограничением амплитудных отклонений (1) и системы с жестким ограничением амплитудных отклонений (2)

¹ Приведенная на рис. 5 зависимость полосы синхронизации от соотношения мощностей (кривая 2) соответствует системе с «предельно» жестким ограничением амплитуд; для реальных систем полоса взаимной синхронизации идентичных генераторов не равна нулю, однако слишком мала, $\frac{\Delta_{гр}}{\alpha_1} \ll 1$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мигулин В. В., Коваленко А. С. «Вестн. Моск. ун-та», 11, № 3, 1971.
2. Коваленко А. С. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., 11, № 6, 697, 1971.
3. Теодорчик К. Ф. «Радиотехника», 1, № 3—4, 3, 1946.
4. Есафов Н. И. ЖТФ, 17, вып. 7, 803, 1947.
5. Рапопорт Г. Н. Сб. научн.-техн. статей, вып. 3. Изд. Ин-та электротехники АН СССР, 1949, стр. 11.
6. Балтина Г. С., Есафов Н. И., Тихонов Ю. Ф. «Вестн. Моск. ун-та», матем., мех., астрон., физ., химия, № 2, 79, 1952.
7. Парыгин В. Н. «Вестн. Моск. ун-та», матем., мех., астрон., физ., химия, № 2, 139, 1957.
8. Хохлов Р. В. Докторская диссертация. МГУ, 1961.
9. Рапопорт Г. Н. «Радиотехника», 6, № 4, 53, 1951.

Поступила в редакцию
6.5 1971 г.

Кафедра
физики колебаний