

В. И. ЧЕРНЫШЕВ

ВЗАИМНАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ, СВЯЗАННЫХ В ЦЕПОЧКУ

Экспериментально и теоретически исследовано явление взаимной синхронизации в цепочках, содержащих до пяти тиратронных генераторов. Для двух связанных генераторов произведен расчет области взаимной синхронизации, распределения амплитуд и установившегося периода колебаний в полосе синхронизации. Проведено сравнение с экспериментом.

В настоящее время методы теории колебаний все в большей степени используются в таких науках, как химия и биология. Известно, что некоторые химические реакции имеют колебательный характер, причем обнаружена пространственная синхронизация колебаний концентрации реагирующих веществ [1—3]. Процесс протекания таких реакций позволяет провести аналогию между химически активной средой и группой взаимосвязанных генераторов. В ансамбле связанных генераторов возникают устойчивые режимы, обусловленные взаимной синхронизацией автоколебаний. Подобные процессы подробно изучены в случае цепочек, составленных из генераторов томсоновского типа [4]. В то же время опыт показывает, что существует обширный класс химических реакций и биологических процессов, модели которых должны состоять из взаимодействующих генераторов релаксационного типа. В связи с этим в настоящей работе проводится исследование синхронных режимов в цепочке, содержащей до пяти связанных тиратронных генераторов. Изучались следующие характеристики этих систем: области расстроек генераторов, внутри которых существует синхронный режим, и распределение установившихся значений амплитуд колебаний генераторов в области расстроек.

Исследовались генераторы пилообразного напряжения, время нарастания которого было много больше времени обратного хода.

Два связанных генератора

В качестве одного генератора использовалась ячейка, схема которой изображена на рис. 1. На тиратроне L_1 собран генератор пилообразного напряжения. Связь между генераторами осуществлялась подачей части пилообразного напряжения с анода L_1 через инвертор на лампе L_2 одной ячейки в точку A другой ячейки, и наобо-

рот. Инвертор необходим для того, чтобы синхронизирующее напряжение с соседнего генератора повышало потенциал зажигания тиратрона синхронизируемого генератора и увеличивало период его колебаний.

Теория синхронизации подобной системы разработана в [5, 6]. Применительно к данной цепочке из двух генераторов система итера-

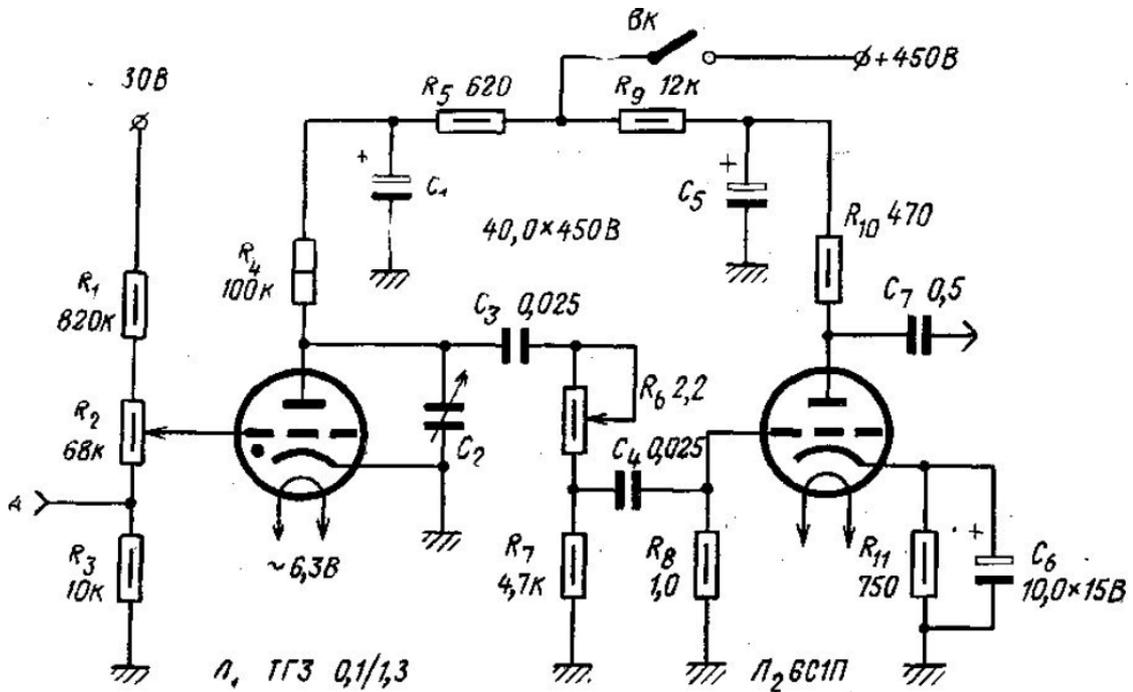


Рис. 1.

ционных уравнений, описывающих процесс установления синхронного режима, имеет вид (для n шага итерации):

$$x_0 \frac{\xi_n}{\tau_x} = \alpha \frac{y_0}{\tau_y} \Delta t_n + \alpha \frac{y_0}{\tau_y} \xi_n + x_0, \quad (1)$$

$$y_0 \frac{\eta_n}{\tau_y} = -\alpha \frac{x_0}{\tau_x} \Delta t_n + \alpha \frac{x_0}{\tau_x} (\eta_n - \xi_n) + y_0,$$

где τ_x и x_0 — период и амплитуда автономных колебаний (при отсутствии связи между генераторами) первого генератора; ξ_n — его период колебаний на n шаге в режиме установления синхронных колебаний; τ_y , y_0 и η_n — соответствующие параметры второго генератора; $\Delta t_n = \sum_{i=1}^n (\xi_i - \eta_i) - t_0$ — временной сдвиг между колебаниями обоих генераторов на n шаге; t_0 — начальный сдвиг во времени между одинаковыми фазами пилообразного напряжения генераторов; α — коэффициент связи. Его считали равным отношению амплитуды модулирующего потенциал зажигания тиратрона напряжения с соседнего генератора к амплитуде автономных колебаний генераторов. Амплитуда модуляции потенциала зажигания вычислялась по пусковой характеристике тиратронов. При этом $x_0 = y_0$ и α полагали одинаковым для обоих генераторов.

С учетом условий синхронизма (индексу c соответствуют установившиеся параметры)

$$\xi_c \equiv \xi_n = \xi_{c-1}, \quad \eta_c \equiv \eta_n = \eta_{c-1},$$

$$\eta_c = \xi_c \text{ и } \Delta t_n = \Delta t_{n-1} \equiv \Delta t_c \quad (2)$$

имеем

$$\xi_c = \frac{\theta + 1}{\theta + \frac{1}{\theta} - \alpha} \tau_x; \quad \Delta t_c = \frac{(\alpha + 1)\theta - 1}{\alpha \left(\theta + \frac{1}{\theta} - \alpha \right)} \tau_x, \quad (3)$$

где $\theta = \tau_x / \tau_y$.

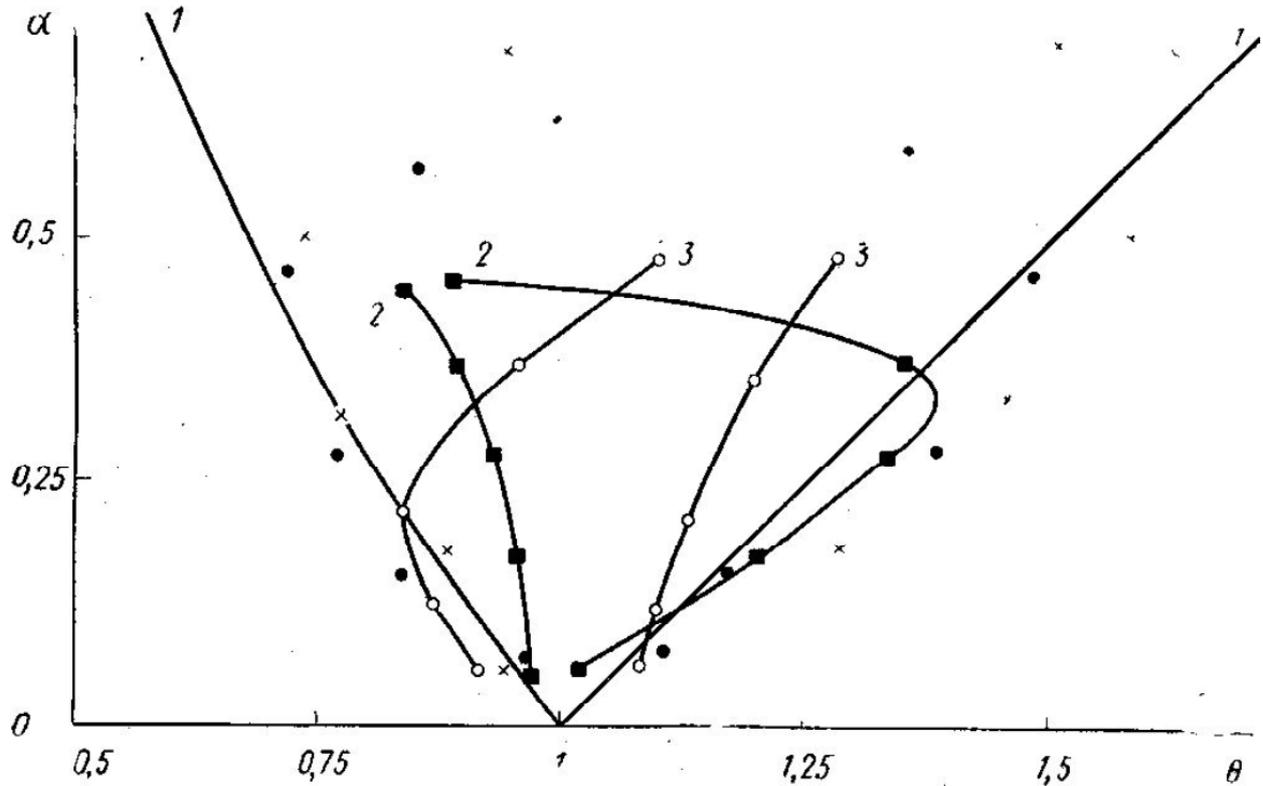


Рис. 2

Так как всегда

$$\xi_c > 0, \quad \Delta t_c \geq 0, \quad \Delta t_c \leq \xi_c, \quad (4)$$

то область синхронизации на плоскости α, θ определяется следующими неравенствами:

$$\begin{aligned} \alpha &> \frac{1}{\theta} - 1, \\ \alpha &< \theta + \frac{1}{\theta}, \\ \alpha &\geq \theta - 1. \end{aligned} \quad (5)$$

Распределение амплитуд описывается формулами

$$\frac{x_c}{x_0} = \frac{\theta + 1}{\theta + \frac{1}{\theta} - \alpha} \quad \text{и} \quad \frac{y_c}{y_0} = \frac{\theta + 1}{\theta^2 - \alpha\theta + 1}. \quad (6)$$

Соотношения (3), (5) и (6) проверялись экспериментально на модели из связанных тиратронных генераторов. Область (5) на плоскости α, θ показана на рис. 2 (границы—кривые 1). Экспериментальные

данные, относящиеся к взаимодействию двух связанных генераторов, показаны темными кружками и крестиками. Полученное в эксперименте расширение области синхронизации при $\alpha < 0,3$ объясняется влиянием экспоненциальной формы пилообразного напряжения в модели, тогда как расчет произведен для напряжения с линейным ростом и спадом. Этот вывод подтвержден специальным экспериментом с генераторами, которые имели явно не линейный, а экспоненциальный рост пилообразного напряжения.

Результаты измерения распределения амплитуд, установившегося периода и временного сдвига между одинаковыми фазами колебаний генераторов в области синхронизации в пределах ошибок измерений совпадают с рассчитанными по формулам (6) и (3) значениями.

Цепочки из трех и пяти генераторов

Задача о взаимной синхронизации цепочек из трех и пяти генераторов решалась экспериментально. Использовалась цепочка генераторов, составленная из ячеек, подобных изображенной на рис. 1. Отличие состоит в том, что инвертор выполнен в виде суммирующего каскада из двух ламп с общей анодной нагрузкой. Напряжение синхронизации, снимаемое с анодов правого и левого соседних генераторов в цепочке, поступало на сетки лампы сумматора-инвертора и с его анодной нагрузки подавалось на сетку тиратрона синхронизируемого генератора. Крайние ячейки в цепочке были собраны по схеме рис. 1.

Перед началом измерений связи разрывались, и элементами R_2 , R_6 и C_2 каждой ячейки (рис. 1) устанавливались соответственно амплитуда, коэффициент связи и частота автономных колебаний, одинаковые для всех генераторов. В процессе измерений емкостью C_2 изменялась частота автономных колебаний какого-либо генератора в цепочке. Таким образом задавалась расстройка перестраиваемого генератора относительно остальных. Величиной расстройки θ будем считать, как и прежде, отношение периода автономных колебаний перестраиваемого генератора к периоду автономных колебаний любого из одинаково настроенных остальных генераторов.

Анализ экспериментальных данных позволяет выяснить следующие закономерности, общие для цепочек из трех и пяти генераторов.

Область синхронизации, соответствующая расположению перестраиваемого генератора с края цепочки, изображена на рис. 2 (границы — кривые 2) для случая пяти генераторов при $T_0 = 2,7$ мс и $U = 60$ В (здесь и далее T_0 и U_0 — период и амплитуда автономных колебаний генераторов). Заметно характерное сужение области синхронизации при $\alpha > 0,3$ и $\theta < 1,35$. Это свойство системы проявляется в значительной степени при числе генераторов в цепочке, большем двух.

Если перестраиваемый генератор не является крайним в цепочке, то границы области взаимной синхронизации видоизменяются и имеют вид, изображенный на рис. 2 (кривые 3) для случая трех генераторов с $T_0 = 2,4$ мс, $U_0 = 80$ В. Особенностью этого случая расположения перестраиваемого генератора является вытянутость области синхронизации в сторону больших α и θ и сужение ее при $\alpha > 0,25$ и $\theta > 0,8$. Замечено, что при расположении перестраиваемого генератора в центре цепочки описанное свойство проявляется наиболее ярко.

Амплитуда установившихся колебаний каждого перестраиваемого генератора мало меняется в полосе синхронизации. Величина этой амплитуды зависит только от места перестраиваемого генератора в цепочке. Амплитуда установившихся колебаний перестраиваемого

генератора уменьшается с ростом θ . Эти свойства цепочки иллюстрирует рис. 3 ($T_0=2,8$ мс, $U=60$ В, $\alpha=0,3$; перестраивался третий генератор в цепочке из пяти генераторов). Номер кривой соответствует порядковому номеру генератора в цепочке. Отметим, что в системе из

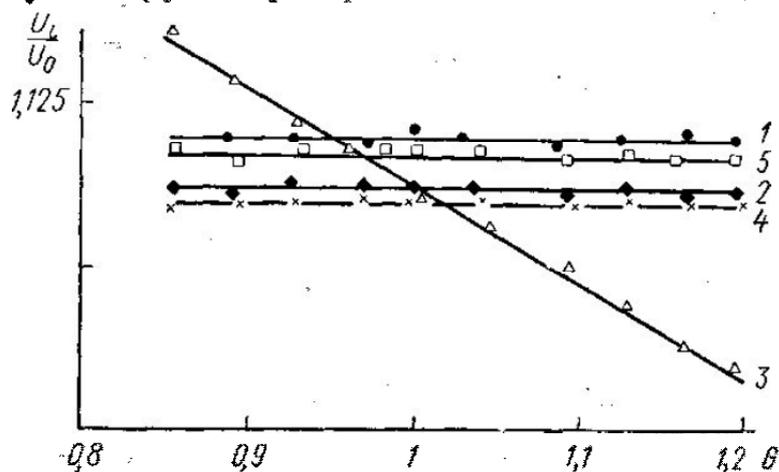


Рис. 3

двух генераторов амплитуда одного уменьшается, другого увеличивается при увеличении расстройки θ (формулы (6)). Неизменность амплитуды перестраиваемых генераторов в цепочке из пяти ячеек объясняется тем, что инверторы имели связь с сетками тиратронов по постоянному току, и в результате происходило динамическое смещение потенциала зажигания тиратрона.

Установившийся период колебаний растет с увеличением коэффициента связи α .

В системе из пяти генераторов установившийся период колебаний практически не зависит от места перестраиваемого генератора в цепочке и расстройки его в полосе синхронизации.

При увеличении числа генераторов в цепочке ширина полосы синхронизации уменьшается.

Последнее свойство является особенностью цепочки релаксационных генераторов. В аналогичных системах томсоновских генераторов происходит расширение полосы синхронизации при увеличении числа генераторов в цепочке [4].

Так как при переходе от трех к пяти генераторам ширина области синхронизации изменяется меньше, чем при переходе от двух к трем, можно предположить, что существуют предельные размеры области синхронизации, которые, начиная с некоторого числа генераторов в цепочке, практически не зависят от их количества.

В заключение автор выражает признательность Л. Н. Капцову и Ю. М. Романовскому за большую помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жаботинский А. М. ДАН СССР, 192, 1964, 1957.
2. Вавилин В. А., Жаботинский А. М., Заикин А. Н. «Журнал физической химии», № 12, 42, 1968.
3. Zaikin A. N., Zhabotinsky A. M. «Nature», 225, 1970.
4. Малафеев В. М., Полякова М. С., Романовский Ю. М. «Изв. вузов», радиофизика, 13, № 6, 936, 1970.
5. Занадворов П. Н. «Вестн. Ленингр. ун-та», сер. физ.-хим., № 4, 1967.
6. Сидорова Г. А. «Вестн. Моск. ун-та», сер. физ., астрон., № 6, 1971.

Поступила в редакцию
8.6 1973 г.

Кафедра
общей физики для мехмата