

09; 10

© 1992

СИНХРОНИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО АВТОГЕНЕРАТОРА С ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Н.И. А й з а ц к и й, А.О. О с т р о в с к и й

1. В работах [1, 2] было показано, что в автономном автогенераторе с запаздывающей обратной связью (ЗОС) одинаковым управляющим параметрам системы могут соответствовать несколько стационарных режимов, отличающихся между собой частотой и амплитудой генерируемого сигнала. Для различных областей управляющих параметров устойчивыми являются разные стационарные режимы. Так, для значений нормированной длины нелинейного усилителя $3.0 \leq l \leq 4.5$ реализуются стационарные режимы с частотой, равной частоте точного черенковского резонанса $\omega_0 = k_0 V_0$, (ω_0 , k_0 – частота и продольное волновое число резонансной с пучком волны, V_0 – начальная скорость пучка), а при $1.5 \leq l \leq 3.0$ – устанавливаются стационарные режимы на другой частоте $\omega = \omega_0 (1 + \Omega)$, $\Omega > 0$, отличающейся от резонансной. При плавном изменении параметра l автоколебательная система переходит от одного устойчивого стационарного режима к другому через состояние „безразличного равновесия“, которое является нестационарным. Таким образом, характерной особенностью автогенератора с ЗОС является наличие при фиксированных параметрах системы одновременно нескольких стационарных режимов. При этом, несмотря на то, что устойчивым является только один стационарный режим, существование другого неустойчивого режима может в той или иной мере влиять на характер автоколебательных процессов. Это влияние может проявиться, например, при синхронизации автогенератора с помощью внешнего гармонического воздействия.

Отметим, что синхронизация автогенераторов различной физической природы, имеющих при фиксированных управляющих параметрах только одно автономное стационарное состояние, изучена к настоящему времени достаточно подробно [3–7]¹. В рассматриваемом нами случае можно ожидать, что если частота внешнего гармонического воздействия близка к частоте неустойчивого стационарного состояния, то процесс синхронизации будет облегчен. В настоящей работе теоретически исследована роль этого состояния в процессе внешней синхронизации распределенной автоколебательной системы с ЗОС.

¹ Мы здесь не рассматриваем синхронизацию в случае, когда в автономном автогенераторе реализуются сложные автомодуляционные процессы.

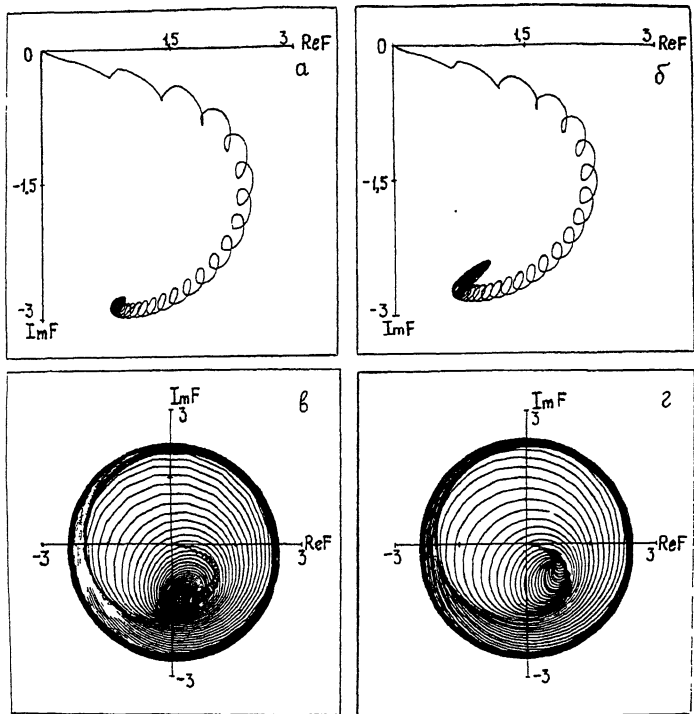


Рис. 1. Траектории, описываемые точкой с координатами $ReF(\tau, \xi = 0)$, $ImF(\tau, \xi = 0)$ при $l = 1.5$ и различных значениях глубины модуляции. а - $k = 0.6$, б - $k = 0.5$, в - $k = 0.2$, г - $k = 0.1$.

2. Ниже рассмотрены две схемы внешней синхронизации. В первой схеме синхронизация осуществляется путем предварительной модуляции пучка по плотности на частоте требуемого стационарного состояния. Во второй схеме для установления синхронных режимов используется внешний гармонический ВЧ сигнал, поступающий от стороннего источника на вход нелинейного усилителя.

Остановимся сначала на первой схеме синхронизации автогенератора с ЗОС. В этом случае на вход электродинамической структуры поступает модулированный пучок, плотность которого изменяется по гармоническому закону

$$n_B = (1 + k \cos \omega_m t) \frac{\delta(r - r_B)}{2\pi r_B},$$

N_0 - погонная плотность частиц пучка, k - глубина модуляции, ω_m - частота модуляции, r_B - радиус пучка.

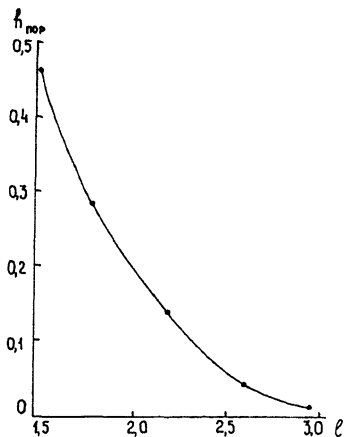


Рис. 2. Зависимость $h_{\text{пор}}$ от нормированной длины замедляющей структуры.

Процесс возбуждения колебаний рассмотрим в приближении малого изменения скорости электронов пучка при их взаимодействии с резонансной волной. Тогда динамика возбуждения ВЧ полей описывается самосогласованной системой уравнений, приведенной в работах [2, 8]. Согласно [1, 2], при фиксированных управляющих параметрах и $h = 0$ эта система уравнений может иметь несколько решений, соответствующих стационарным режимам генерации на различных частотах. При этом только один из стационарных режимов устойчив и реализуется в автогенераторе. Как было отмечено выше, в области $1.5 \leq l \leq 3.0$ неустойчивым является режим на резонансной частоте $\omega = \omega_0$ ($\Omega = 0$) и устойчивым одночастотный режим с $\omega > \omega_0$ ($\Omega > 0$). Исследуем возможность внешней синхронизации автогенератора на резонансной частоте в указанном интервале параметра l . В этом случае частота модуляции пучка по плотности должна быть близкой или равной ω_0 . Рассмотрим случай строгого синхронизма $\omega_m = \omega_0$. Решение поставленной задачи проведено путем численного моделирования. Используемые при расчетах значения управляющих параметров соответствуют автономным стационарным режимам и определены в [2].

Численный анализ показал, что при $l = 1.5$ минимальное значение глубины модуляции, при котором наступает синхронизация (порог синхронизации), равно $h_{\text{пор}} \approx 0.45$. Следовательно, при $h \geq h_{\text{пор}}$ в динамической системе устанавливается стационарное состояние с $\Omega = 0$. В противном случае в автогенераторе превалирует тенденция к установлению режима с $\Omega > 0$. Приведенные на рис. 1 траектории, описываемые точкой с координатами $\text{Re}F(\tau, \xi = 0)$, $\text{Im}F(\tau, \xi = 0)$ (F — безразмерное значение напряженности продольной компоненты электрического поля; τ , ξ — безразмерные временная и пространственная координаты), отображают

динамику установления стационарных состояний при различных h . Видно, что для синхронизированных режимов ($h > h_{пор}$) переходной процесс заканчивается установлением постоянных значений ReF , ImF (рис. 1, а, б). В случае $h < h_{пор}$ (синхронизация не достигается) установившаяся траектория представляет собой замкнутую окружность с центром в начале координат $F(\tau, \xi) = A(\xi)e^{-i\Omega\tau}$ (рис. 1, в, г). Отметим, что переход автогенератора с ЗОС к режиму синхронизации происходит через такое же состояние „безразличного равновесия“, как и в автономной системе при смене одного устойчивого стационарного режима другим [1, 2]. Существование этого состояния в неавтономном автогенераторе обусловлено следующим. При подходе по параметру h к порогу синхронизации возникает ситуация, при которой ни один из протекающих в автогенераторе процессов (процесс синхронизации и процесс установления стационарного состояния с $\Omega > 0$) не является доминирующим. В результате для выхода автоколебательной системы на устойчивый одночастотный режим генерации требуется неограниченно большое время. Данная ситуация соответствует нестационарному состоянию системы, которое можно рассматривать как состояние „безразличного равновесия“. Малейшее отклонение от этого состояния по параметру h в ту или иную сторону приводит к установлению стационарного режима генерации.

С ростом l порог синхронизации снижается. На рис. 2 приведена зависимость $h_{пор}$ от l . Видно, что при $l = 2.6$ значение $h_{пор}$ уменьшается почти на порядок по сравнению с $l = 1.5$. Вблизи границы перехода автономного автогенератора от устойчивого стационарного режима с $\Omega > 0$ к режиму с $\Omega = 0$ l_* ($3.0 < l_* < 3.1$) порог синхронизации равен $h_{пор} \approx 7.5 \cdot 10^{-3}$. Наблюдаемое уменьшение $h_{пор}$ связано с существованием в автономном автогенераторе при $l \rightarrow l_*$ неустойчивого стационарного состояния на резонансной частоте. При увеличении l до l_* автономная система стремится выйти из этого неустойчивого состояния [1, 2]. Поэтому в случае $l \rightarrow l_*$ достаточно слабого внешнего воздействия для захвата колебаний на резонансной частоте. Очевидно, что в самой точке перехода l_* величина этого воздействия является минимальной и соответствует нижней границе порога синхронизации.

Рассмотрим теперь синхронизацию автогенератора с ЗОС на резонансной частоте при воздействии внешнего гармонического сигнала, подаваемого на вход нелинейного усилителя от стороннего СВЧ источника: $E_{сиг} = C e^{i\psi}$; C , ψ — амплитуда и фаза синхросигнала. Численное моделирование проведено для немодулированного пучка при $\psi = 0$ и различных l . Расчеты показали, что при $l = 1.5$ минимальная амплитуда синхросигнала, начиная с которой наступает захват колебаний на резонансной частоте, равна $C_{пор} \approx 0.5$. Отметим, что при $l = 1.5$ энергия внешнего сигнала, соответствующая порогу синхронизации $P_{пор}$, составляет $\approx 2.5\%$ от суммарной энергии ВЧ поля на входе электродинамической структуры в установившемся режиме генерации. Это указывает на возможность эффективной синхронизации автогенератора путем воз-

действия гармонического сигнала малой мощности. При подходе к точке l_* пороговое значение синхросигнала снижается. Так, при $l = 2.6$ это значение равно $C_{пор} \approx 0.04$. Следовательно, с ростом l происходит улучшение условий для синхронизации автогенератора с ЗОС.

Приведенные результаты показывают, что существование неустойчивого стационарного режима генерации может существенно влиять на синхронизацию распределенного автогенератора с ЗОС на резонансной частоте. Установлено, что при подходе по параметру l к границе перехода автономной системы от устойчивого стационарного режима с $\Omega > 0$ к режиму с $\Omega = 0$ порог синхронизации стремится к нулю. Это связано с возрастанием роли автономных процессов, стремящихся к установлению стационарного состояния на резонансной частоте. Переход распределенного автогенератора к режиму синхронизации происходит через нестационарное состояние „безразличного равновесия“. Такое состояние системы возникает тогда, когда ни один из протекающих в неавтономном автогенераторе процессов (процесс синхронизации и процесс, связанный с выходом системы на собственный устойчивый стационарный режим) не является доминирующим. Малейшее отклонение от этого состояния при изменении амплитуды синхросигнала или глубины модуляции пучка приводит к установлению соответствующего стационарного автоколебательного режима.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] А й з а ц к и й Н.И., О с т р о в с к и й А.О. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 24. С. 86-90.
- [2] А й з а ц к и й Н.И., О с т р о в с к и й А.О. // Препринт ХФТИ № 91-39. 1991. 12с.
- [3] Д е м ь я н ч е н к о А.Г. Синхронизация генераторов гармонических колебаний. М.: Энергия. 1976. 240 с.
- [4] А д л е р Р. // ТИИЭР. 1973. Т. 61. № 10. С. 5-11.
- [5] В e n f o r d J., S m i t h R.R., S z e H. e. a. // Microwave and Particle Beam Sources and Propagation. Proceedings of SPIE. 1988. V.873. P.23-27.
- [6] Б е ц к и й О.В., П а л а т о в К.И., Ц е й т л и н М.Б., И л ь и н Ю.Д. Побочные колебания в электронных приборах СВЧ. М.: Связь. 1984. 152 с.
- [7] Ч е р н о у с о в Ю.Д., Ш е б о л а е в И.В. // Радиотехника и электроника. 1988. Т. 33. № 7. С. 1546-1551.
- [8] Г и н з б у р г Н.С., К у з н е ц о в С.П. // Релятивистская высокочастотная электроника. ИПФ АН СССР. Горький. 1981. С. 101-144.

Харьковский
физико-технический
институт

Поступило в Редакцию
25 марта 1992 г.