

**ТЕОРИЯ
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

УДК 537.868

**ВЗАИМНАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ КАК СПОСОБ СУММИРОВАНИЯ
МОЩНОСТЕЙ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ**

© 2019 г. В. И. Каганов*

*МИРЭА – Российский технологический университет,
Российская Федерация, 119454 Москва, просп. Вернадского, 78*

*E-mail: kaganovwil@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.05.2017 г.

После доработки 07.11.2018 г.

Принята к публикации 12.11.2018 г.

Рассмотрено возбуждение активной фазированной антенной решетки путем подключения к каждому излучателю СВЧ-автогенератора. Получена система нелинейных дифференциальных уравнений, описывающая работу автогенераторов в режиме взаимной синхронизации. Проведено компьютерное моделирование работы системы. Приведен пример расчета по компьютерной программе с построением графиков переходного процесса установления автоколебаний, подтверждающих возможность существования режима взаимной синхронизации множества автогенераторов.

DOI: 10.1134/S0033849419030069

1. СУЩНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Синхронизация, как особый режим функционирования множества однотипных устройств, приводит к единому ритму их работы. Сказанное относится ко многим явлениям в природе и технике, в том числе к часам с маятником; генераторам промышленной частоты, работающим в единой электроэнергетической системе; разного рода биологическим объектам; сердцу человека, состоящему из четырех камер [1].

Проблема синхронизации имеет прямое отношение и к радиоэлектронным устройствам, в том числе активной фазированной антенной решетке (АФАР) с множеством однотипных излучателей, к которым подводятся одинаковые сигналы, отличающиеся только специально управляемой начальной фазой. В такой АФАР обычно используется общий автогенератор, сигнал которого разветвляется по всем излучателям (рис. 1а) [2].

В частном случае, когда АФАР применяется для дистанционной передачи электрической энергии, без необходимости электронного сканирования лучом антенны, можно рассмотреть систему с использованием для каждого излучателя автономного автогенератора. Такое построение системы позволяет отказаться от блока делителей мощности сигнала, потери в котором снижают энергетические показатели АФАР.

Можно указать на два случая применения АФАР только для суммирования мощностей сигналов, когда к излучателям требуется подводить сигналы равной амплитуды, частоты и начальной фазы: 1) при дистанционной передаче СВЧ-энер-

гии с перспективных солнечно-космических электростанций и 2) для дистанционной подзарядки аккумуляторов транспортных средств, в том числе беспилотных летательных аппаратов [3]. Структурная схема такой АФАР с взаимной синхронизацией автогенераторов может иметь вид, приведенный на рис. 1б. При таком построении активной части ФАР следует обеспечить точное равенство частот и начальных фаз всех СВЧ-автогенераторов, питающих излучатели, что можно добиться путем их взаимной синхронизации.

2. ВЗАИМНАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ СВЧ-АВТОГЕНЕРАТОРОВ

Рассмотрим кольцевую схему взаимной синхронизации множества автогенераторов, в которой каждый автогенератор связан только с двумя соседними (рис. 2). В такой системе целесообразно использовать двухтактный автогенератор, имеющий два не связанных между собой входа [4].

Расстояние между автогенераторами должно равняться целому числу длин волн. Для увеличения мощности сигнала, подводимого к излучателю, после автогенератора включают СВЧ-усилитель (рис. 1б).

В основе проводимого далее анализа лежит нелинейное дифференциальное уравнение автогенератора – уравнение Ван-дер-Поля, описывающее процесс установления автоколебаний [5]:

$$\frac{d^2u}{d\tau^2} - \mu(1 + a_1u - a_2u^2 - a_3u^4) \frac{du}{d\tau} + u = 0, \quad (1)$$

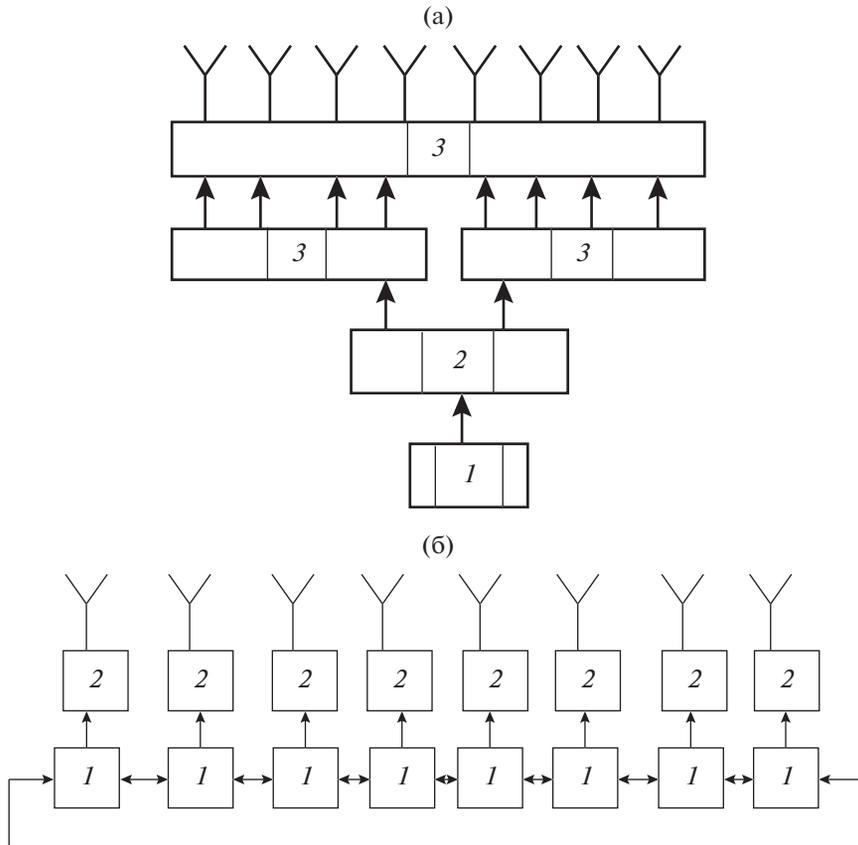


Рис. 1. АФАР: а – с делителями мощности сигнала, б – с автогенераторами; 1 – СВЧ-автогенератор, 2 – СВЧ-усилитель мощности, 3 – делители мощности сигнал.

где $\tau = \omega t$, ω – резонансная частота колебательно-го контура, близкая к частоте автоколебаний.

В режиме синхронизации колебаний по кольцевой схеме к правой части данного уравнения

необходимо добавить два внешних сигнала (u_2 и u_3) и уравнение (1) принимает вид:

$$\frac{d^2 u}{d\tau^2} - \mu \Phi(u) \frac{du}{d\tau} + u = k_2 u_2 + k_3 u_3, \quad (2)$$

где k_2 и k_3 – коэффициенты связи, $\Phi(u) = 1 - a_1 u - a_2 u^2 - a_3 u^4$ – нелинейная функция.

Весь ансамбль связанных между собой автогенераторов описывается системой из N нелинейных дифференциальных уравнений вида (2) с учетом связи каждого автогенератора с двумя соседними:

$$\frac{d^2 u_1}{d\tau^2} - \mu_1 \Phi_1(u_1) \frac{du_1}{d\tau} + \Omega_1 u_1 - k_2 u_2 - k_N u_N = 0, \quad (3a)$$

$$\frac{d^2 u_2}{d\tau^2} - \mu_2 \Phi_2(u_2) \frac{du_2}{d\tau} + \Omega_2 u_2 - k_1 u_1 - k_3 u_3 = 0, \quad (3б)$$

$$\dots, \quad \frac{d^2 u_n}{d\tau^2} - \mu_n \Phi_n(u_n) \frac{du_n}{d\tau} + \Omega_n u_n - k_1 u_1 - k_{N-1} u_{N-1} = 0, \quad (3в)$$

где $\Phi_i(u_i)$ – нелинейная функция, k_i – коэффициент связи i -го автогенератора с другими, Ω_i – от-

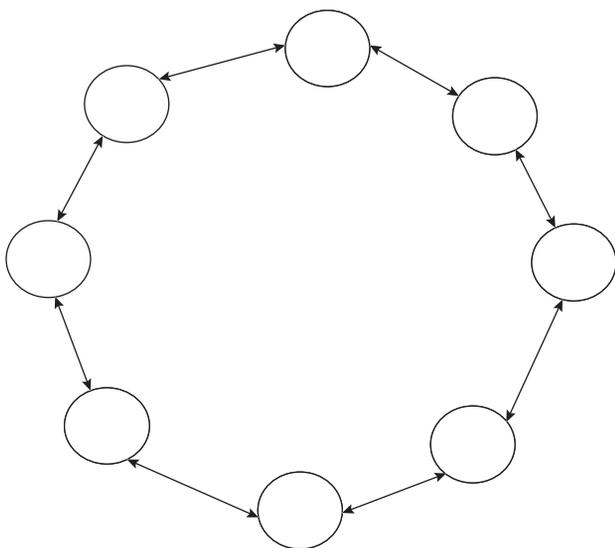


Рис. 2. Кольцевая схема взаимной синхронизации генераторов.

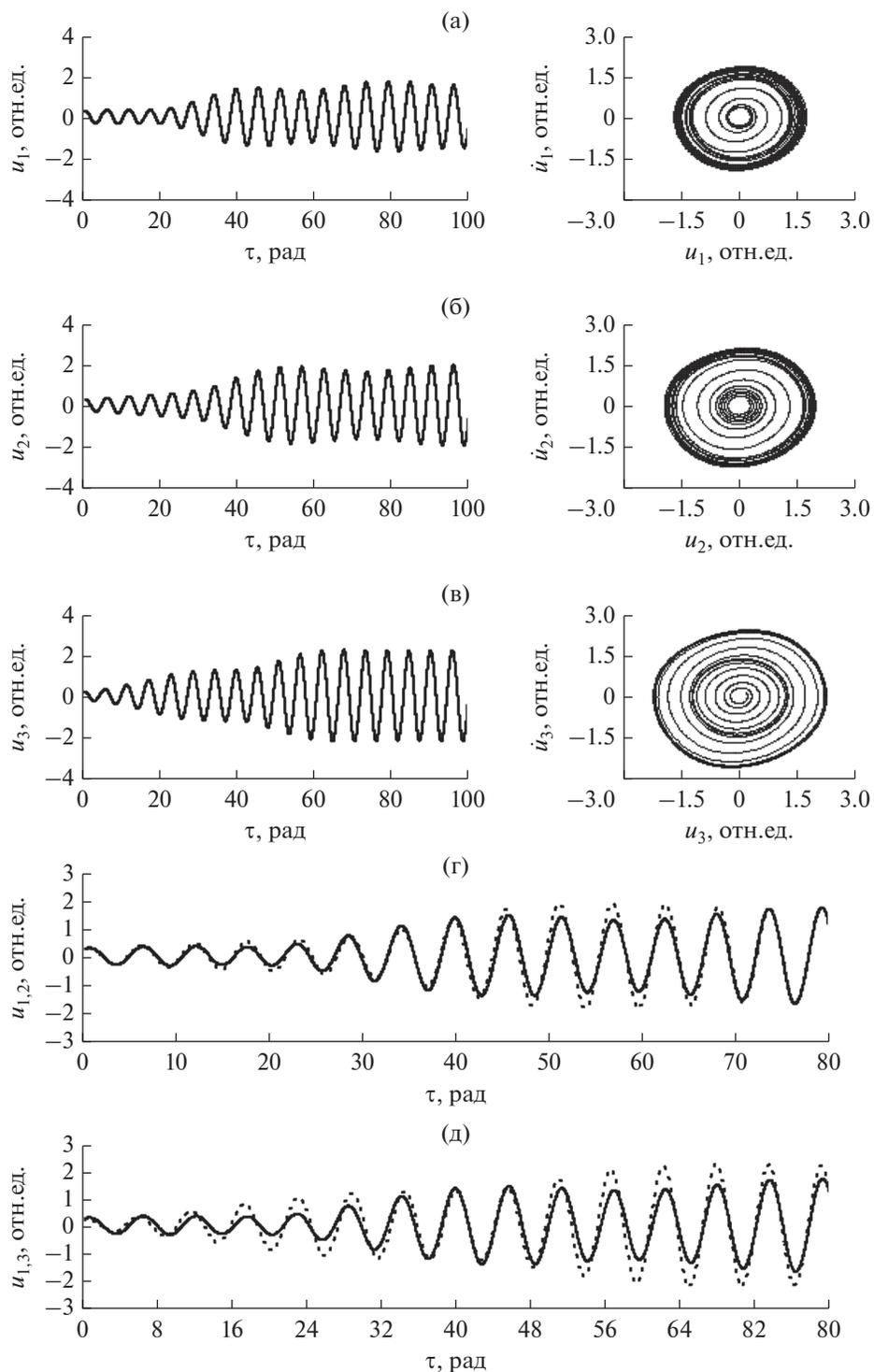


Рис. 3. Графики установления автоколебаний трех генераторов.

ношение собственной частоты i -го автогенератора в автономном режиме работы к частоте автоколебаний в составе системы.

Все автогенераторы, входящие в систему, обладают равными свойствами или условно “правами”. В

результате взаимодействия между всеми автогенераторами при выполнении определенных условий в системе устанавливается единый ритм работы, означающий равенство частот всех автоколебаний и ввод системы в режим взаимной синхронизации.

3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВЗАИМНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Для решения системы нелинейных уравнений (3а)–(3в) была составлена компьютерная программа. Результаты решения по ней при разных начальных условиях позволяют сделать следующие выводы:

1) коэффициенты связи между автогенераторами могут быть равными $k_i = 0.1$;

2) первоначальное отклонение частот автоколебаний генераторов могут различаться между собой в пределах 10%.

Графики решения для системы для трех из 10 автогенераторов, входящих в кольцевую схему (рис. 2), приведены на рис. 3. На рис. 3а–3в показаны процессы установления автоколебаний в каждом отдельно взятом автогенераторе при $\Omega_1 = 1$ (а), $\Omega_2 = 1.05$ (б), $\Omega_3 = 1.1$ (в). Справа представлены фазовые портреты соответствующих автоколебаний. Точка над буквой u обозначает производную du/dt .

На рис. 3г представлены совмещенные графики установления автоколебаний в генераторах (а) (сплошная кривая) и (б) (штриховая кривая), а на рис. 3д – в генераторах (а) (сплошная кривая) и (в) (штриховая кривая). Подробные сведения о соответствующих вычислениях и построении графиков приведены в работе [5].

Из этих рисунков видно, что в системе установлен режим взаимной синхронизации, при котором колебания автогенераторов абсолютно идентичны по частоте и начальной фазе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложено в определенных случаях (например, при дистанционной передаче электрической энергии) использовать для возбуждения ФАР ансамбль автогенераторов в режиме взаимной синхронизации.

2. Компьютерное моделирование данной системы подтвердило возможность существования такого режима работы при связи между генераторами по кольцевой схеме и первоначальном расхождении собственных частот автоколебаний в пределах 10%, что вполне достижимо.

3. Предлагаемый способ создания мощного СВЧ-излучения относится к беспроводной, дистанционной передаче электрической энергии, в частности на беспилотные летающие аппараты без посадки последних на Землю. Поэтому в статье проблема модуляции при суммировании СВЧ-сигналов не рассматривается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Блехман И.И.* Синхронизация в природе и технике. М.: URSS, 2005.
2. Активные фазированные антенные решетки / Под ред. Воскресенского Д.И. М.: Радиотехника, 2004.
3. *Глазер П.Э.* // ТИИЭР. 1977. Т. 65. № 8. С. 67.
4. *Каганов В.И.* Радиопередающие устройства. М.: Академия, 2002.
5. *Каганов В.И.* Радиотехнические цепи и сигналы. Компьютеризированный курс. М.: Форум-Инфра, 2017.