ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1981, Т. 22, № 3

УДК 534.1:621.3.072.9:621.319.729

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СИНХРОННЫХ РЕЖИМОВ ГЕНЕРАТОРОВ С РЕЗОНАНСНОЙ СВЯЗЬЮ

Г. П. Минина

(кафедра физики колебаний)

Цель настоящей работы — получение частотных характеристик системы взаимно синхронизованных генераторов для исследования режимов стабилизации и управления частотой. Ранее исследовались другие аспекты подобных задач. Так, в работах [1, 2] рассматривалась взаимная синхронизация непосредственно связанных генераторов с кратным и дробно-кратным соотношением частот, особое внимание уделялось флуктуациям в таких системах. Стабилизация частоты генераторов на основном тоне внешним резонатором исследована в работе [3], где выявлены режимы, приводящие к сложению мощностей.

Рассмотрим систему двух генераторов с соотношением частот 3:2, связанных через добротный контур, который настроен на третью гармонику первого генератора и вторую гармонику второго генератора. Уравнения движения в этой системе имеют вид:

$$\begin{aligned} &\ddot{x} + \delta_{\text{н}1}(x)\dot{x} + \nu_1^2 x = \alpha_1 \ddot{z}, \\ &\ddot{y} + \delta_{\text{н}2}(y)\dot{y} + \nu_2^2 y = \alpha_2 \ddot{z}, \\ &\ddot{z} + \delta\dot{z} + \nu^2 z = \beta_1 \ddot{x} + \beta_2 \ddot{y}, \end{aligned} \tag{1}$$

x, y, z — напряжения на емкостях соответственно первого, второго генераторов и промежуточного контура; α_i и β_i — коэффициенты связей.

Решение этой задачи в общем виде весьма сложно и требует машинного расчета. Для получения аналитических зависимостей характеристик системы от параметров приходится ввести целый ряд упрощающих предположений. Ограничимся случаем, когда кроме основного тона в генераторе существенную роль играет только одна гармоника. Заметим, что экспериментально этот случай можно реализовать в генераторах на туннельных диодах. Тогда решение системы (1) можно искать в виде:

$$x = A\sin(\omega t - \alpha) + B\sin(3\omega t - \beta),$$

$$y = C\sin[(3/2)\omega t - \gamma] + D\sin(3\omega t - \delta),$$

$$z = E\sin(3\omega t - \varepsilon).$$

Методом Теодорчика получаем систему 10 нелинейных укороченных уравнений. В аналитическом виде эта система неразрешима. Рассмотрим случай, когда амплитуды гармоник малы по сравнению с амплитудами основного тона, и поведем вторичное укорочение уравнений по

методу Р. В. Хохлова, т. е. считаем $A=A_0+A_1$, $C=C_0+C_1$, причем $B\sim A_1\ll A_0$ и $D\sim C_1\ll C_0$.

Исключив из полученной системы линеаризованных уравнений амплитуды и фазы, можно получить частотное уравнение в параметрическом виде:

$$\left(\frac{1}{k_{12}^2}+\frac{1}{k_{21}^2}\right)\eta+\left(\frac{k_1^2}{k_{12}^2}+\frac{k_2^2}{k_{21}^2}\right)\frac{\eta}{\eta^2+\delta^2}-\left(\frac{\xi_1}{k_{12}^2}+\frac{\xi_2}{k_{21}^2}\right)=2\frac{\eta}{\eta^2+\delta^2}\sin\Omega,$$

$$\left(\frac{1}{k_{12}^2}-\frac{1}{k_{21}^2}\right)\eta+\left(\frac{k_1^2}{k_{12}^2}-\frac{k_2^2}{k_{21}^2}\right)\frac{\eta}{\eta^2+\delta^2}-\left(\frac{\xi_1}{k_{12}^2}-\frac{\xi_2}{k_{21}^2}\right)=2\frac{\eta}{\eta^2+\delta^2}\sin\Omega, \tag{2}$$

η, ξ_1, ξ_2 — безразмерные расстройки соответственно частоты автоколебаний ω и частот первого генератора ν_1 и второго ν_2 относительно частоты контура ν с учетом сдвига частоты за счет реактивной составляющей промежуточного контура; k_1 и k_2 — связи первого и второго генераторов с контуром; k_{12} и k_{21} — связи генераторов через контур друг с другом; $\Omega=2\alpha-3\gamma$ — сдвиг фаз между гармониками первого и второго генераторов.

Уравнения (2) в координатах η, ξ_1 и ξ_2 описывают сложную поверхность. Предлагаемый способ состоит в построении этой поверхности и сечении ее плоскостями $\xi_1=\text{const}$ и $\xi_2=\text{const}$, которые дают частотные кривые системы при перестройке соответственно второго и первого генераторов. Исследование этой поверхности облегчается тем, что ее сечения плоскости $\eta=\text{const}$ представляют собой эллипсы, главные оси которых направлены вдоль осей координат

$$x_1=\frac{\delta}{2}\left(\frac{\xi_1}{k_{12}^2}+\frac{\xi_2}{k_{21}^2}\right) \text{ и } x_2=\frac{\delta}{2}\left(\frac{\xi_1}{k_{12}^2}-\frac{\xi_2}{k_{21}^2}\right),$$

а центры смещены согласно уравнению (2). Для построения частотных кривых необходимо построить набор эллипсов при различных значениях η/δ (рис. 1). Переход к осям $\xi_1\delta/k_{12}^2$ и $\xi_2\delta/k_{21}^2$ соответствует повороту системы координат на 45°. Проведем прямую $\xi_1\delta/k_{12}^2$. Точки пересечения ее с эллипсами отложим в координатах η/δ и ξ_2/δ и получим частотную кривую зависимости частоты синхронизованных колебаний системы при перестройке второго генератора (рис. 2, жирные линии). Аналогично строятся частотные кривые по перестройке первого генератора. Производя более сложные построения, можно получить зависимость частоты колебаний системы от перестройки контура.

Из графика частотных кривых видно, что существуют режимы стабилизации частоты генераторов контуром (область *А*), когда значительное изменение частоты одного из генераторов мало сказывается на изменении частоты системы, и режимы управления частотой (область *Б*), когда, меняя частоту одного из генераторов, можно изменять частоту системы.

На рис. 2 заштрихованы проекции объемной фигуры на соответствующие плоскости. На рис. 1 эта проекция представляет собой область расстроек генераторов, при которых существуют синхронные режимы (ограничена жирной линией).

Предлагаемый способ описания позволяет легко рассмотреть ус-

тойчивость стационарных режимов системы по фазовому критерию, так как в этом случае фазовый критерий имеет простую геометрическую интерпретацию. Точка на поверхности η, ξ_1, ξ_2 устойчива, если проекция

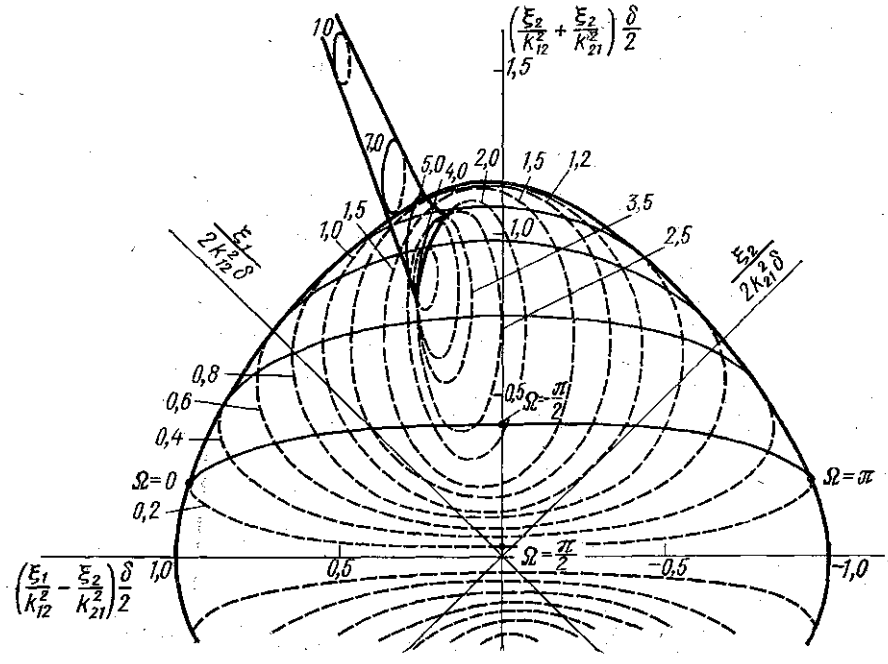

Рис. 1

внешней нормали к поверхности в этой точке (для $\eta<0$) или внутренней нормали (для $\eta<0$) на ось η/δ положительна. Смена знака нормали связана со сменой направления обхода эллипса с изменением Ω при прохождении точки $\eta/\delta=0$. Устойчивые участки эллипсов на рис. 1 и частотных кривых на рис. 2 изображены сплошной линией, неустойчивые — пунктиром. Проекции устойчивых по фазовому условию областей на рис. 2 отмечены двойной штриховкой.

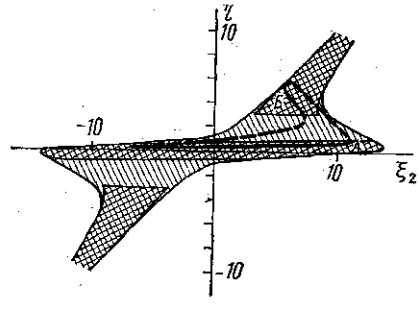

Рис. 2

Анализируя уравнения (2), легко отметить на эллипсах области синфазного $\left(-\frac{\pi}{2}<\Omega<\frac{\pi}{2}\right)$ и противофазного режимов (см. рис. 1). Из рисунка видно, что в области влияния стабилизирующего контура могут быть устойчивыми как синфазные, так и противофазные колебания. При больших расстройках, когда определяющую роль играет синхронизация генераторов, связанных реактивной связью, устойчивы только синфазные режимы.

Предложенный способ рассмотрения взаимной синхронизации генераторов позволяет получить относительно простые аналитические выражения, при помощи которых можно исследовать зависимость режимов работы генераторов от параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Клибанова И. М. Особенности синхронного взаимодействия колебаний в автоколебательной системе с двумя степенями свободы.— Изв. вузов. Сер. Радиофизика, 1973, **16**, № 11, с. 1709—1716. [2] Клибанова И. М. Взаимная синхронизация генераторов с целочисленным отношением частот.— Изв. вузов. Сер. Радиофизика, 1968, **11**, № 11, с. 1676—1685. [3] Дворников А. А. О стабилизации частоты ансамбля автогенераторов внешним резонатором.— Изв. вузов. Сер. Радиофизика, 1975, **18**, № 11, с. 1645—1652.

Поступила в редакцию
16.05.80

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1981, Т. 22, № 6

УДК 53.05/08:532.574.07

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС «ОПТИЧЕСКИЙ ДОПЛЕРОВСКИЙ АНЕМОМЕТР — ЭВМ ЕС-1010» ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕДЛЕННЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ

М. В. Евдокимов, А. В. Приезжев

(кафедра общей физики и волновых процессов)

В последнее время оптические доплеровские анемометры (ОДА) стали применяться для исследования потоков, для которых характерна большая плотность светорассеивающих частиц и большие градиенты скорости, например потоков суспензий, крови, протоплазмы в тонких капиллярах [1]. Выходные сигналы фотоприемников ОДА в этих случаях имеют сложную структуру, в результате чего такие распространенные методы обработки сигналов, как последовательный спектральный анализ, счет нулей, слежение за частотой и пр. [2], оказываются малоэффективными. Особенно это касается случаев нестационарного течения жидкости [3]. Для получения адекватной информации о временных зависимостях таких характеристик потока, как средняя или максимальная скорость, профиль скорости и др., необходима дополнительная машинная обработка результатов измерения. В случае низкоскоростных потоков (с максимальными доплеровскими сдвигами частоты до 3—7 кГц) сбор и обработку сигналов ОДА и их спектров можно осуществить с помощью широко распространенной ЭВМ ЕС-1010. При этом возможны комплексная автоматизация эксперимента и проведение его в реальном масштабе времени.

Ниже описан комплекс ОДА — ЭВМ ЕС-1010 для исследования потоков со скоростями от нескольких мкм/с до нескольких мм/с. Возможны параллельный ввод и обработка сигналов ОДА из нескольких пространственно разнесенных измерительных объемов, а также сигналов, несущих вспомогательную информацию об исследуемом объекте.

Входящий в состав комплекса ОДА может быть построен по любой схеме — дифференциальной или с опорным пучком [2]. Выбор конкретной схемы зависит от особенностей исследуемого объекта. ЭВМ ЕС-1010 используется в следующей конфигурации: центральный процессор с блоками аппаратного умножения и деления, ОЗУ объемом 24 кслова, минидиск емкостью 800 кбайт, АЦП с мультиплексором на 16 каналов, алфавитно-цифровой дисплей, цифровые входы-выходы, таймер, АЦПУ, ЦАП на сопротивлениях, осциллоскоп с памятью типа С1-8, двухкоординатный самописец типа ДРП-5.

Рассеянное и опорное излучение с помощью блока приемной оптики направляется на фотоприемник. После усиления и аналоговой