

УДК 621.373.42

О ВНЕШНЕЙ СИНХРОНИЗАЦИИ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОЙ АФАР

А. А. Дворников, Г. М. Уткин, А. М. Чуков

Методом медленно меняющихся амплитуд рассматриваются некоторые случаи внешней синхронизации автогенераторов, входящих в состав автоколебательной активной фазированной антенной решетки.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время все большее внимание привлекают автоколебательные активные фазированные антенные решетки (АФАР) (см., например, [1-6, 9]), т. е. АФАР с активными модулями-автогенераторами. Одно из важных преимуществ использования в АФАР автогенераторов вместо традиционных усилителей состоит в том, что современные твердотельные активные элементы СВЧ диапазона (диоды Ганна, ЛПД и т. д.) эффективно работают именно в автоколебательном режиме.

В настоящее время основным способом фазирования автоколебательных АФАР является фазирование их модулей с помощью внешнего синхронизирующего источника. При анализе подобного способа фазирования далеко не всегда можно ограничиться рассмотрением, как это обычно делается, только внешней синхронизации автогенераторов. В реальной АФАР между автогенераторами, входящими в ее состав, всегда существуют взаимные связи, обусловленные взаимными сопротивлениями излучателей антенной системы, общими цепями питания и синхронизации автогенераторов и т. п. Эти связи приводят к появлению дополнительной взаимной синхронизации автогенераторов.

В предлагаемой работе в достаточно общих предположениях получены укороченные уравнения одного класса автоколебательных АФАР. Уравнения учитывают взаимные связи между автогенераторами решетки и позволяют проанализировать влияние этих связей на режим внешней синхронизации АФАР. В качестве примера исследуется влияние взаимных связей двух одинаковых автоколебательных модулей простейшей АФАР на характеристики ее внешней синхронизации, обсуждаются вопросы внешней синхронизации симметричной автоколебательной АФАР, содержащей n модулей.

В имеющейся литературе подобные вопросы практически не рассмотрены.

ИСХОДНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Рассмотрим систему n одноконтурных автогенераторов, на которые через нерезонансные каналы связи подаются синхронизирующие сигналы от одного внешнего генератора. Автогенераторы будем считать одинаковыми, в общем случае слегка расстроенными относительно друг друга по частоте. Излучатели антенной решетки будем считать также одинаковыми, а их резонансные свойства — существенно более худшими, чем резонансные свойства контуров автогенераторов L, C, g (рис. 1). Выдвинутые предположения обычно выполняются на практике. Не огра-

ничивая общности изложения, будем считать, что связь автогенераторов с излучателями осуществляется через малые емкости связи $C_{св}$, такие, что выполняются неравенства

$$C_{св} \ll C, \quad 1 \gg |Z_{ii}| \omega C_{св} \quad (i=1, 2, \dots, n),$$

где Z_{ii} — собственное сопротивление i -го излучателя решетки.

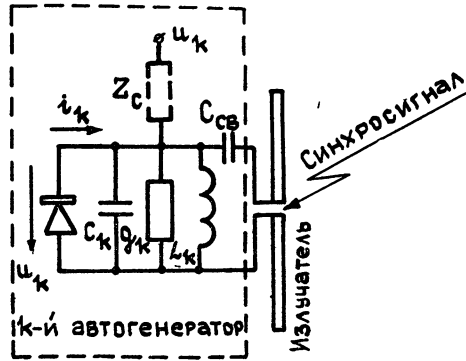


Рис. 1. Принципиальная схема k -го автоколебательного модуля АФАР.

В этих достаточно общих предположениях, пользуясь методом работы [8], для медленно меняющихся амплитуды U_k и фазы ψ_k напряжения u_k k -го автогенератора АФАР получим укороченные уравнения

$$\begin{aligned} 2C_k \frac{dU_k}{dt} &= U_k [S_{ka}(U_k) - g_{\varepsilon k}] - \sum_{j \neq k}^n U_j d_{kj} \times \\ &\times \cos(\varphi_{kj} - \Delta_{kj}) - U_c d_{kc} \cos(\varphi_{kc} - \Delta_{kc}), \\ 2C_k \frac{d\psi_k}{dt} &= S_{kp}(U_k) - 2C_k \Delta\omega_k - \sum_{j \neq k}^n \frac{U_j}{U_k} d_{kj} \times \\ &\times \sin(\varphi_{kj} - \Delta_{kj}) - \frac{U_c}{U_k} d_{kc} \sin(\varphi_{kc} - \Delta_{kc}), \end{aligned} \quad (1)$$

где $S_{ka(p)}(U_k)$ — активная (реактивная) составляющая крутизны тока i_k активного элемента k -го автогенератора по первой гармонике; C_k — емкость резонатора k -го автогенератора; $\Delta_{kj} = \psi_k - \psi_j$, $\Delta\omega_k = \omega_c - \omega_k$, $\Delta_{kc} = \psi_k - \psi_c$; ω_k — собственная частота контура k -го автогенератора; ω_c , U_c , ψ_c — частота, амплитуда и фаза напряжения синхронизирующего генератора; $\text{Im } y_{kj} = b_{kj} = d_{kj} \sin \varphi_{kj}$; $\text{Re } y_{kj} = g_{kj} = d_{kj} \cos \varphi_{kj}$; $y_{kj} = \omega_c^2 C_{св}^2 Z_{kj}$; Z_{kj} — взаимное сопротивление между k -м и j -м излучателями антенной решетки; y_{kc} — проводимость элемента связи между синхронизирующим генератором и k -м автогенератором антенной решетки. Взаимные и собственные сопротивления излучателей решетки записаны относительно точек питания излучателей. Так как обычно КПД резонатора автогенератора достаточно велик, то можно считать, что $g \ll \omega_c^2 C_{св}^2 R_{ii}$ и, следовательно, $g_{\varepsilon} \approx \omega_c^2 C_{св}^2 R_{ii}$.

Следует отметить, что внешняя синхронизация модулей АФАР может осуществляться или облучением апертуры АФАР полем излучателя, связанного с синхронизирующим генератором, или за счет введения дополнительной сети разводки сигнала синхронизации по модулям АФАР

(элементы Z_c , показанные на рис. 1 пунктиром). Как в первом, так и во втором случаях АФАР описывается уравнениями (1).

Уравнения (1) учитывают взаимные связи между автогенераторами решетки и позволяют проанализировать влияние этих взаимных связей на режим внешней синхронизации подобных АФАР. В качестве примера рассмотрим несколько случаев синхронизации простейших АФАР.

ВНЕШНЯЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ ДВУХ СВЯЗАННЫХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ АФАР

Рассмотрим простейшую трехэлементную антенную решетку (рис. 2). Все три излучателя для простоты считаем одинаковыми. Два излучателя 1 и 2 являются нагрузками нерасстроенных по частоте относительно друг друга автогенераторов AG_1 и AG_2 , а на третий излучатель подается напряжение синхросигнала с амплитудой, равной U_c . Внешняя синхронизация автогенераторов AG_1 и AG_2 осуществляется за счет облучения «синхронизирующим» излучателем 3 «активных» излучателей 1 и 2, связанных соответственно с автогенераторами AG_1 и AG_2 . Кроме того, существует взаимная связь между AG_1 и AG_2 через общее поле излучения излучателей 1 и 2. Она определяет возможность дополнительной взаимной синхронизации указанных автогенераторов.

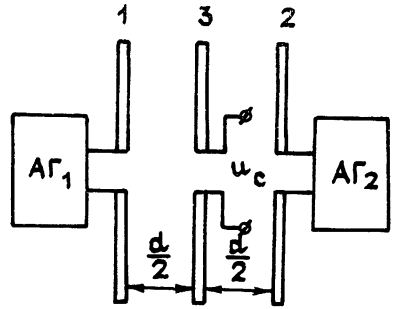


Рис. 2. Блок-схема трехэлементной автоколебательной АФАР.

Рассмотрим в системе, изображенной на рис. 2, синфазный равноамплитудный режим, характеризующийся следующими соотношениями:

$$U_1 = U_2 = U_0, \quad \psi_1 = \psi_2.$$

Для указанного режима из (1) получаем следующие стационарные уравнения:

$$S_a(U_0) - g_{\Sigma 0} = \frac{U_c}{U_0} d_c \cos(\varphi_c - \Delta_c), \quad (2)$$

$$2C\Delta\omega_0 = -\frac{U_c}{U_0} d_c \sin(\varphi_c - \Delta_c),$$

где $g_{\Sigma 0} = g_a + g_{12}$, $\Delta\omega_0 = \Delta\omega + (b_{12}/2C)$, $\varphi_c = \varphi_{1c} = \varphi_{2c}$, $\Delta_c = \Delta_{1c} = \Delta_{2c}$, $\Delta\omega = \omega_c - \omega_1 = \omega_c - \omega_2$.

Уравнения (2) полностью аналогичны стационарным уравнениям одного синхронизированного автогенератора.

При аппроксимации нелинейности тока активного элемента полиномом третьей степени

$$i = \alpha u - \frac{4}{3} \beta u^3$$

получим из (2) амплитудно-частотные характеристики $y_0 = f(\xi)$ исследуемой системы в неявном виде для нормированных переменных:

$$\frac{y_c^2 - y_0^2(1 - y_0^2)^2}{y_0^2} = \xi^2, \quad (3)$$

где $\xi = \frac{2C\Delta\omega_0}{\beta U_{00}^2}$ — нормированная расстройка синхросигнала; $y_0 = U_0/U_{00}$ — нормированная амплитуда автоколебаний автогенератора; $y_c = \frac{U_c}{U_{00}} \frac{d_c}{\beta U_{00}^2}$ — нормированная амплитуда синхросигнала; $U_{00}^2 = \frac{\alpha - g_{30}}{\beta}$. Здесь U_{00} — амплитуда колебаний автогенераторов системы рис. 2 в отсутствие синхросигнала, т. е. при $U_c = 0$.

Несмотря на сходство стационарных уравнений рассматриваемой АФАР со стационарными уравнениями одиночного синхронизированного автогенератора их условия устойчивости существенно различны.

Математический анализ устойчивости рассматриваемого режима показывает, что он устойчив, если выполняются следующие неравенства:

$$y_0^2 > \frac{1}{2}, \quad (4)$$

$$3\xi^2 + 9 \left(y_0^2 - \frac{2}{3} \right)^2 > 1;$$

$$y_0^2 > \frac{A}{2}, \quad (5)$$

$$3(\xi - B)^2 + 9 \left(y_0^2 - \frac{2}{3} A \right)^2 > A^2,$$

где

$$A = 1 + 2(\omega_c C_{cb})^2 \frac{R_{12}}{\beta U_{00}^2}, \quad B = 2(\omega_c C_{cb})^2 \frac{X_{12}}{\beta U_{00}^2},$$

$$Z_{12} = R_{12} + jX_{12}, \quad R_{12} = \operatorname{Re} Z_{12}, \quad X_{12} = \operatorname{Im} Z_{12}.$$

Условия (4) полностью аналогичны условиям устойчивости одиночного синхронизированного автогенератора. Они не зависят от величины и характера взаимной связи между автогенераторами АФАР.

Условия же (5) существенно зависят от величины и характера взаимной связи между автогенераторами. Из (5) следует, что наличие $X_{12} \neq 0$ приводит к несимметрии условий устойчивости (5) относительно оси $\xi = 0$. На первый взгляд это выглядит странно, так как рассматриваемая система симметрична. Однако более подробное рассмотрение физики этого вопроса подтверждает правильность (5). Действительно, при исследовании локальной устойчивости стационарного режима комплексным амплитудам автогенераторов даются малые произвольные вариации. Для двух автогенераторов эти произвольные вариации можно представить в виде суммы ортогональных, и так как для малых вариаций рассматриваемая система линейна, то и независимых вариаций — равноамплитудных синфазных и равноамплитудных противофазных. Из рассмотрения условий затуханий синфазных вариаций получаем условия устойчивости (4), а из условий затухания противофазных вариаций — условия устойчивости (5). Синфазные равноамплитудные вариации не возбуждают элементов взаимной связи между автогенераторами, поэтому в (4) отсутствуют параметры взаимной связи между АГ₁ и АГ₂. Противофазные же вариации возбуждают эти элементы связи, поэтому можно считать, что для противофазных вариаций эти элементы связи

подключены параллельно контурам автогенераторов. А это, в свою очередь, вызывает сдвиг резонансных частот контуров автогенераторов, что и выражается в сдвиге по частоте эллипса неустойчивости (5).

Условия устойчивости (4), (5) зависят и от величины связи автогенераторов АФАР с излучателями. Оптимальной является такая величина этой связи, при которой активные элементы автогенераторов отдадут максимум мощности в антенную решетку. Нетрудно показать, что для обеспечения оптимальной связи автогенераторов с излучателями при $\xi = 0$ необходимо выполнение равенства

$$\omega_c^2 C_{св}^2 = \frac{\alpha}{R_{11} + R_{12}} x,$$

где x определяется из уравнения

$$\frac{0,5(0,5 - x)^2}{(1 - x)^3} = y_c^2.$$

Для рассматриваемого случая оптимальной связи параметры A и B в (5) будут равны

$$A = 1 + 2R_{12} \frac{x}{(R_{11} + R_{12})(1 - x)},$$

$$B = \frac{2X_{12} x}{(R_{11} + R_{12})(1 - x)}. \quad (6)$$

С учётом (6) на рис. 3 показана амплитудно-частотная характеристика (3) рассматриваемой системы для случая, когда в качестве излучателей используются полуволновые вибраторы. Там же на рис. 3 пунктиром показаны границы устойчивости синфазного равноамплитудного режима, соответствующие неравенствам (4), (5). При построении кривых рис. 3 для определенности считалось, что $y_c = 0,5$, $d/\lambda = 1,0$ (λ — длина волны). Область неустойчивых стационарных режимов заштрихована.

Анализируя рис. 3, можно сделать вывод о том, что наличие связи между автогенераторами в системе рис. 2 может приводить к уменьшению полосы внешней синхронизации рассматриваемой АФАР по сравнению со случаем, когда этой взаимной связи нет. Это уменьшение полосы синхронизации, как уже отмечалось, имеет место не за счет изменения собственно амплитудно-частотных характеристик синхронизации, а за счет изменения условий устойчивости. В отсутствие взаимных связей между автогенераторами АФАР для случая рис. 3 полоса внешней синхронизации была бы равна $2|\xi_1|$, а наличие взаимной связи приводит к уменьшению этой полосы до величины $|\xi_2| + |\xi_1|$.

Влияние взаимной связи между автогенераторами на устойчивость системы может быть разной в зависимости от величины и характера взаимной связи. Рассмотрим два простых случая.

1. $X_{12} = 0$. Следовательно, $B = 0$ и границы устойчивости симметричны относительно расстройки $\xi = 0$. Тогда при $R_{12} > 0$ получаем, что $A > 1$, а при $R_{12} < 0$, соответственно, $A < 1$. В то же время при $A < 1$ для выполнения условий устойчивости (4), (5) достаточно выполнения лишь условий (4), а при $A > 1$ — лишь (5). Следовательно, при $R_{12} > 0$ возможно сужение полосы внешней синхронизации рассматриваемой системы и тем больше, чем больше R_{12} . При данной амплитуде синхронизирующего сигнала U_c всегда существует некоторое предельное значение $R_{12}^{\text{пред}} > 0$, при котором полоса внешней синхронизации системы, изображенной на рис. 2, равна нулю. При $R_{12} > R_{12}^{\text{пред}}$ рассматриваемая син-

хронизация системы невозможна. Из рис. 4, соответствующего рассматриваемому случаю $X_{12} = 0$, следует, что при $R_{12} < 0$ полоса синхронизации равна $2|\xi_1|$, а при $R_{12} > 0$ она уменьшается и для некоторого конкретного $R_{12} > 0$, которому соответствует рис. 4, равна $2|\xi_2| < 2|\xi_1|$. Рис. 4 наглядно показывает существование $R_{12}^{\text{пред}}$.

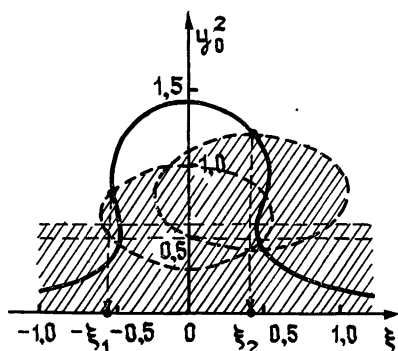


Рис. 3.

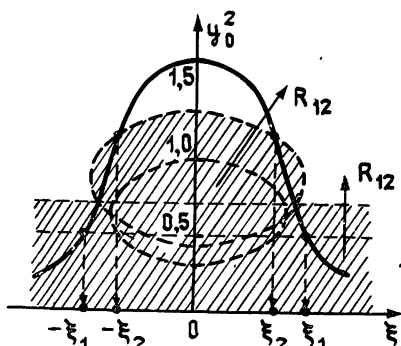


Рис. 4.

Рис. 3. АЧХ и границы устойчивости синфазного режима для системы с полуволновыми вибраторами.

Рис. 4. Границы устойчивости при $X_{12} = 0$, $R_{12} \neq 0$.

Существенно отметить, что для случая $X_{12} = 0$ устойчивые участки амплитудно-частотных характеристик системы при любых R_{12} остаются симметричными относительно оси $\xi = 0$.

2. $R_{12} = 0$. Следовательно, $A = 1$, но $B \neq 0$. Поэтому границы устойчивости несимметричны относительно оси $\xi = 0$. Это приводит к несимметрии устойчивых участков амплитудно-частотных характеристик синхронизации рассматриваемой системы (рис. 5, y_0''). Видно, что наличие $X_{12} \neq 0$ приводит лишь к горизонтальному сдвигу эллипса неустойчивости (5) (рис. 5). При $X_{12} > 0$ получаем $B > 0$ и, следовательно, эллипс неустойчивости (5) сдвигается вправо по оси ξ , а при $X_{12} < 0$ имеем $B < 0$ и соответственно эллипс неустойчивости (5) сдвигается влево. Таким образом, при $X_{12} \neq 0$ полоса внешней синхронизации также может сужаться, но ни при каких X_{12} эта полоса не может быть равна нулю, как это было в случае 1. Кроме того, при малых синхронизирующих силах (y_c' на рис. 5) или при достаточно большом X_{12}

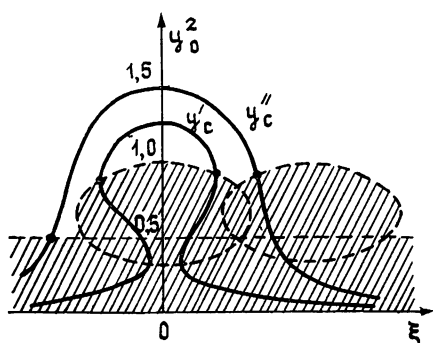


Рис. 5.

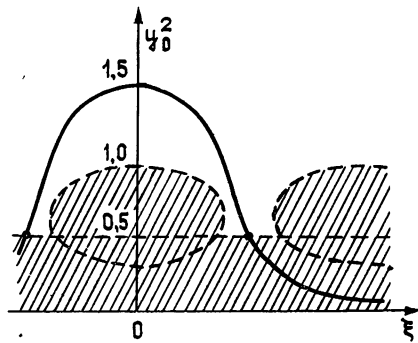


Рис. 6.

Рис. 5. Границы устойчивости при $R_{12} = 0$, $X_{12} \neq 0$.

Рис. 6. Пример АЧХ и границ устойчивости при $R_{12} = 0$ и большой величине X_{12} .

(когда эллипс неустойчивости (5) не имеет перекрывающихся областей с эллипсом неустойчивости (4), рис. 6) величина полосы внешней синхронизации может не зависеть от конкретного значения величины X_{12} и быть равной полосе внешней синхронизации системы в отсутствие взаимных связей между автогенераторами АФАР.

ВНЕШНЯЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ n АВТОГЕНЕРАТОРОВ АФАР

Получение обозримых результатов, аналогичных полученным в первой части предлагаемой работы, для системы из n автогенераторов в общем случае сопряжено со значительными трудностями. Однако с некоторыми новыми допущениями ряд результатов можно получить достаточно просто.

Рассмотрим случай, когда синхронизирующий сигнал одинаковым образом подается на все автогенераторы АФАР. Автогенераторы считаем нерасстроенными относительно друг друга по частоте. Пусть, кроме того, для упрощения математических выкладок эти автогенераторы связаны через излучатели друг с другом одинаковым образом, т. е. считаем, что $g_{kj} = g_{12}$, $b_{kj} = b_{12}$.

Рассматривая, как и ранее, равноамплитудный синфазный режим АФАР ($U_1 = U_2 = \dots = U_n = U$, $\psi_1 = \psi_2 = \dots = \psi_n = \psi$), получаем из (1) в предположении безынерционности активных элементов автогенераторов стационарные уравнения в виде уравнений (2), у которых

$$\begin{aligned} g_{30} &= g_3 + (n-1)g_{12}, \\ \Delta\omega_0 &= \Delta\omega + \frac{n-1}{2C} b_{12}. \end{aligned} \quad (7)$$

Все остальные коэффициенты уравнений остались прежними.

С помощью уравнений (2), (7) в предположении слабой внешней синхронизации автогенераторов антенной решетки можно получить оценку полосы внешней синхронизации, которая, как следует из второго уравнения (2) и (7), равна

$$\Pi_0 = \frac{d_c}{C} \frac{U_c}{U}. \quad (8)$$

Причем, как следует из того же уравнения, в пределах полосы расстроек (8) фазовые соотношения в рассматриваемой системе подчиняются уравнению

$$\sin(\varphi_c - \Delta_c) = - \frac{2CU}{d_c U_c} \Delta\omega_0. \quad (9)$$

Оценка полосы (8) получена без исследования устойчивости фазовых соотношений (9). Проведем исследование этой устойчивости. Используя (1), (2), (7), нетрудно показать, что синфазный стационарный режим в системе устойчив, если

$$\cos(\varphi_c - \Delta_c) < 0; \quad (10)$$

$$ng_{12} + \frac{U_c}{U} d_c \cos(\varphi_c - \Delta_c) < 0. \quad (11)$$

Из (11) видно, что при $g_{12} < 0$ условие (11) с учетом выполнения (10) удовлетворяется всегда. Следовательно, в этом случае полоса внешней синхронизации АФАР будет равна Π_0 (см. (8)). Если же $g_{12} > 0$,

то, как это следует из (11), происходит сужение полосы внешней синхронизации по закону

$$\Pi = \Pi_0 \sqrt{1 - \left(\frac{ng_{12}U}{U_c d_c} \right)^2}. \quad (12)$$

Причем при достаточно большой величине g_{12} , равной $U_c d_c / nU$, полоса $\Pi = 0$. При увеличении g_{12} полоса Π остается равной нулю.

Как и для случая двух автогенераторов АФАР, разобранный в первой части работы, полоса внешней синхронизации здесь сужается из-за изменения условий устойчивости стационарного режима.

Существенно отметить, что, как и в первой части работы, при слабой синхронизации основную роль в уменьшении полосы внешней синхронизации играет не реактивная составляющая взаимной связи автогенераторов b_{12} , а резистивная g_{12} .

Из (12) видно, что предельное значение $g_{12}^{\text{пред}}$, при котором $\Pi = 0$, равно $g_{12}^{\text{пред}} = \frac{d_c}{n} \frac{U_c}{U}$.

Величина полосы внешней синхронизации рассматриваемых АФАР зависит не только от величины и характера взаимосвязи автогенераторов, входящих в состав антенной решетки, но и от способа подачи синхросигнала на систему.

Например, при подаче синхросигнала на один автогенератор полоса синхронизации АФАР уменьшается в n раз по сравнению со случаем подачи синхросигнала на все автогенераторы. Это объясняется уменьшением отбираемой от синхронизирующего генератора мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. Strull, H. Cooper, Ch. Grauling, Патент США кл. 325-105 (НОЗб7/00), № 3875513, опубл. 1.04.75.
2. M. P. Wasse, E. Denison, IEEE Trans., MTT-19, № 7, 616 (1971).
3. Ю. И. Серяков, Труды МАИ, вып. 203, 94 (1976).
4. Д. И. Говорова, В. П. Мироненко и др., Электронная техника, серия 1, Электроника СВЧ, № 11, 433 (1968).
5. Л. И. Пономарев, А. К. Ельцов, Ю. В. Лиходед, Изв. вузов — Радиоэлектроника, 21, № 2, 108 (1978).
6. А. С. Тагер, В. М. Вальд-Перлов, Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ, изд. Сов. радио, М., 1968, с. 480.
7. Г. Т. Марков, Д. М. Сазонов, Антенны, изд. Энергия, М., 1975, с. 528.
8. А. А. Дворников, Г. М. Уткин, Радиотехника и электроника, № 3, 550 (1974).
9. А. Г. Демьянченко, Синхронизация генераторов гармонических колебаний, изд. Энергия, М., 1976, с. 240.

Московский энергетический
институт

Поступила в редакцию
5 апреля 1979 г.

EXTERNAL SYNCHRONIZATION OF AUTO-OSCILLATION ACTIVE PHASED ANTENNA LATTICE (APAL)

A. A. Dvornikov, G. M. Utkin, A. M. Chukov

By the method of slowly varying amplitudes some cases are considered of external synchronization of autogenerators being a part of auto-oscillation active phased antenna lattice.