

А. С. КОВАЛЕНКО

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ СИНХРОНИЗАЦИИ ТОМСОНОВСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ С РАЗЛИЧНЫМ ХАРАКТЕРОМ ОГРАНИЧЕНИЯ АМПЛИТУД

В работе изучаются процессы установления синхронного режима в системах томсоновского типа с различным соотношением мощностей взаимодействующих генераторов. Результаты проведенных экспериментов показывают хорошее соответствие с теоретическими выводами.

### Введение

Теоретическому и экспериментальному изучению процессов взаимной синхронизации томсоновских генераторов посвящено много работ [1—6]. Принципиальным свойством таких систем является малое изменение колебательной энергии системы (по сравнению с общим ее запасом) за период высокочастотных колебаний, что эквивалентно допущению квазиконсервативности АКС и позволяет проводить усреднение потерь за период. Таким образом, для систем, близких к линейным консервативным, вводится понятие эффективного затухания, характеризующего среднюю за период высокочастотных колебаний (автоколебаний) мощность потерь в системе. Расчет процессов синхронизации подобных систем, проведенный в [7], подтверждает определяющее влияние эффективного затухания на течение процессов синхронизации в подобных системах. Рассматривая взаимодействие двух связанных реактивно генераторов томсоновского типа с контурами в цепи сеток, запишем в безразмерном виде систему укороченных уравнений (см. [7]):

$$\begin{aligned} \dot{A} &= \theta_1(A) A + \alpha_1 B \sin \Phi + \beta_1 B \cos \Phi, \\ \dot{B} &= \theta_2(B) B - \alpha_2 A \sin \Phi + \beta_2 A \cos \Phi, \\ \dot{\Phi} &= \xi_1 - \alpha_1 \frac{B}{A} \cos \Phi + \beta_1 \frac{B}{A} \sin \Phi, \\ \dot{\Psi} &= \xi_2 - \alpha_2 \frac{A}{B} \cos \Phi - \beta_2 \frac{A}{B} \sin \Phi, \\ \dot{\Phi} &= -\Delta + \left( \alpha_1 \frac{B}{A} - \alpha_2 \frac{A}{B} \right) \cos \Phi - \left( \beta_1 \frac{B}{A} + \beta_2 \frac{A}{B} \right) \sin \Phi, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\alpha_{1,2}$  — коэффициенты реактивной (емкостной) связи,  $\beta_{1,2}$  — коэффициенты гальванической связи, затухание в связи считаем малым  $\beta_{1,2} \ll \alpha_{1,2}$ ;  $s = \alpha_2/\alpha_1$  ( $s$  — коэффициент направленности связи). Для определенности считаем  $s \leq 1$ .

Влияние эффективного затухания на процессы синхронизации наиболее ярко проявляется при изучении процессов вблизи полосы синхронизации (режима биений). Именно такой анализ и проведен в работе [7]. В настоящем сообщении изложены результаты экспериментальной проверки теоретических выводов, сделанных в [7].

## § 1. Описание установки. Методика измерений

Экспериментальная модель полностью соответствует теоретической (см. рис. 1 работы [7]) и представляет собой два связанных малой емкостью генератора томсоновского типа с контурами в цепи сеток. Сближение парциальных частот генераторов осуществлялось изменением контурной емкости в одном из генераторов, направленная связь между генераторами — включением в цепь связи катодного повторителя. Характер ограничения амплитуд менялся независимо в каждом из генераторов путем изменения положительной обратной связи. Подобным образом менялись также амплитуды свободных автоколебаний в каждом из генераторов и устанавливалось требуемое их соотношение.

Все основные измерения проведены с помощью анализатора спектра С4-12. Частоты спектральных составляющих колебаний измерялись следующим образом. На экране спектроанализатора отмечалось положение исследуемого спектра, затем вместо экспериментальной модели ко входу спектроанализатора включался генератор Г4-18А, частота синусоидальных колебаний которого совмещалась последовательно с частотами спектральных составляющих и измерялась частотомером Ф-571 с цифровым отсчетом. Кроме того, частоту биений, а также разность парциальных частот можно было измерить непосредственно самим спектроанализатором, в котором для этой цели предусмотрен внутренний генератор калиброванной метки.

Относительные амплитуды спектральных составляющих измерялись вольтметром ВК7-9, на ход которого подавалось постоянное напряжение после интегрирующей цепи спектроанализатора. Контроль парциальных частот осуществлялся частотомером Ф-571. Уход частоты генерации после прогрева приборов в течение 2—3 час не превышал 1 гц за 3 сек; эксперимент проведен на частоте  $f \approx 540$  кГц.

Погрешность измерения частот, частотных интервалов и относительных амплитуд не превышает 10%. Разрешающая способность спектроанализатора была не хуже 10 гц во всем диапазоне наблюдаемых частот.

Результаты экспериментов приведены на рис. 1, 3, 5, 7, на которых сплошными линиями проведены теоретически рассчитанные кривые. Кроме того, приведены некоторые спектрограммы (рис. 2, 4, 6), которые дают наглядное представление об основных закономерностях установления синхронного строго периодического режима в системах томсоновского типа при уменьшении расстройки.

## § 2. Системы с жестким ограничением амплитуд

Отметим внешнее синусоидальное воздействие на автоколебательную систему (направленная связь,  $n/s = \infty$ ,  $n = 1$ ,  $s = 0$ ).

В работе [8] изложены результаты аналогичных экспериментов, которые показали хорошее согласие с расчетами как в случае мягкого, так и в случае жесткого ограничения амплитудных отклонений. Однако в случае жесткого ограничения амплитуд разрешающая способность спектроанализатора не позволила четко наблюдать спектры колебаний вблизи полосы синхронизации. Поэтому мы приводим результаты дополнительно проведенных экспериментов (рис. 1 и 2), которые убедительно подтверждают сделанные в предыдущих работах теоретические выводы.

На рис. 1 приведены амплитуды составляющих колебаний в области биений в менее мощном генераторе А (жесткое ограничение амплитудных отношений). Вертикальными штрихпунктирными линиями (а, б, в) отмечены те расстройки, для которых приведены спектрограммы (рис. 2а, б, в).

Как видим, при уменьшении расстройки вблизи полосы синхронизации амплитуда «основной» спектральной составляющей ( $g_0$ ), частота которой

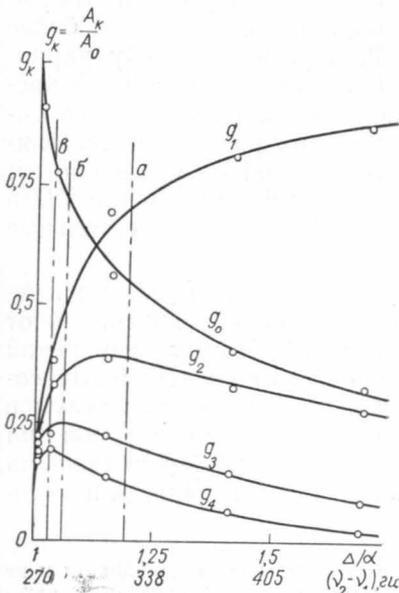


Рис. 1

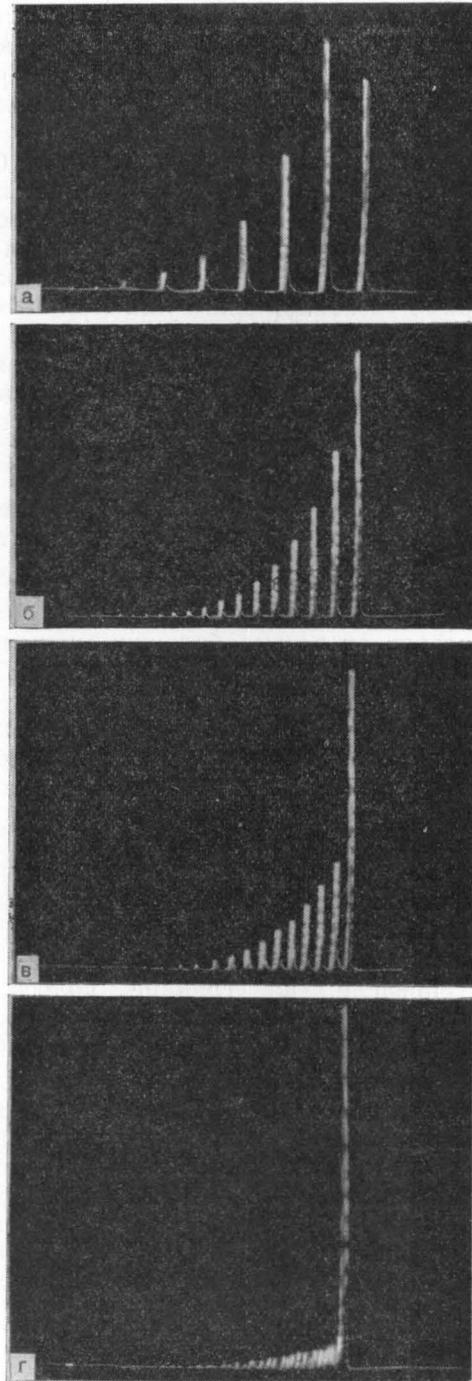


Рис. 2

равна частоте воздействия, монотонно возрастая, достигает на границе полосы синхронизации значений, равных амплитуде свободных автоколебаний. Одновременно амплитуды остальных составляющих спектра непрерывно уменьшаются до нуля. Описанный процесс сопровождается уменьшением частоты биений до нуля.

Нетрудно наблюдать экспериментально непрерывный переход от системы с жестким ограничением к системам с мягким ограничением амплитудных отклонений. Такой переход сопровождается расширением полосы синхронизации, уменьшением амплитуды синхронных колебаний на границе полосы синхронизации; вместе с тем также непрерывно возрастает минимальная частота биений и увеличивается область устойчивых значений фаз. Сравнивая системы с различным характером ограничения амплитуд, отметим, что в любом случае переход к синхронному режиму (при уменьшении расстройки) осуществляется путем уменьшения амплитуд всех спектральных составляющих колебаний, кроме «основной», до нуля. При этом на границе полосы синхронизации амплитуда основной составляющей достигает значений, при которых нарушаются энергетические условия поддержания автоколебаний, что свидетельствует об общности механизма синхронизации систем томсоновского типа независимо от характера ограничения амплитуд.

### Взаимная синхронизация генераторов различной мощности ( $s = 1, n/s \neq 1$ )

При изменении соотношения мощностей<sup>1</sup> взаимодействующих генераторов от весьма больших значений  $n/s \gg 1$  до сравнимых мощностей спектральный состав колебаний вблизи полосы синхронизации все более усложняется и остается все меньше оснований сопоставлять конкретную спектральную составляющую с автоколебаниями в одном из генераторов; с другой стороны, все более четко выделяются на спектрограмме биений вблизи синхронизма парциальных частот два максимума, один из которых расположен между парциальной частотой более мощного генератора и нормальной частотой, другой — между парциальной частотой менее мощного генератора и второй нормальной частотой. При значительном приближении к полосе синхронизации максимумы остаются в тех же интервалах, один из них растет и приближается к первой нормальной частоте, второй — уменьшается; в пределе, на границе полосы синхронизации, на месте 1-го максимума устанавливаются синхронные колебания, все остальные составляющие спектра уменьшаются до нуля.

Проведенные измерения показывают хорошее совпадение с расчетами. Зависимость частот спектральных составляющих колебаний от расстройки парциальных частот показана на рис. 3. Помимо измерений основных расчетных параметров (амплитуд и частот спектральных составляющих) были сняты экспериментальные кривые максимумов (кривые 1 и 2 на рис. 3), показывающие положение максимумов на спектрограмме биений вблизи полосы синхронизации. Вертикальными штрихпунктирными линиями на рис. 3 отмечены расстройки, для кото-

<sup>1</sup> Поведение генераторов существенно зависит от соотношения их мощности и не зависит (в случае систем томсоновского типа) от самих амплитуд свободных автоколебаний (если при их изменении не меняется характер ограничения амплитудных отклонений).

рых приведены спектрограммы (рис. 4а, б, в). Результаты экспериментов приведены для случая  $n/s=2$  ( $s=1$ ).

Положение максимумов качественно подтверждает теоретические выводы о течении процессов в системах рассматриваемого вида. Действительно, по мере приближения к полосе синхронизации условия поддержания автоколебаний в менее мощном генераторе А ухудшаются, следовательно, уменьшается его энергетическое воздействие на более мощный генератор В. В результате чего эффективное затухание в генераторе В в процессе биений все менее отличается от нуля, условия наилучшей передачи энергии выполняются на частоте, все более близкой к нормальной. Об этом свидетельствуют положение 1-го миниму-

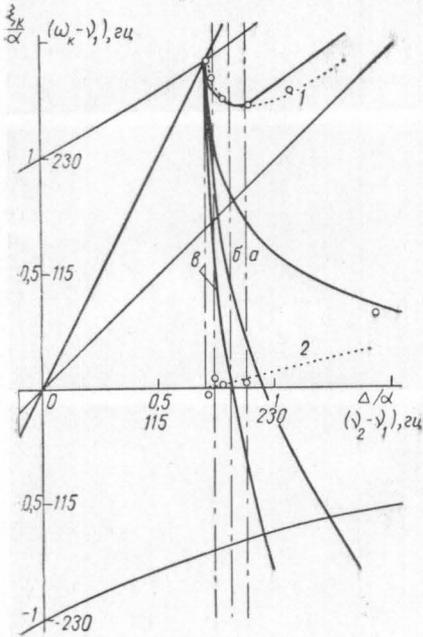


Рис. 3

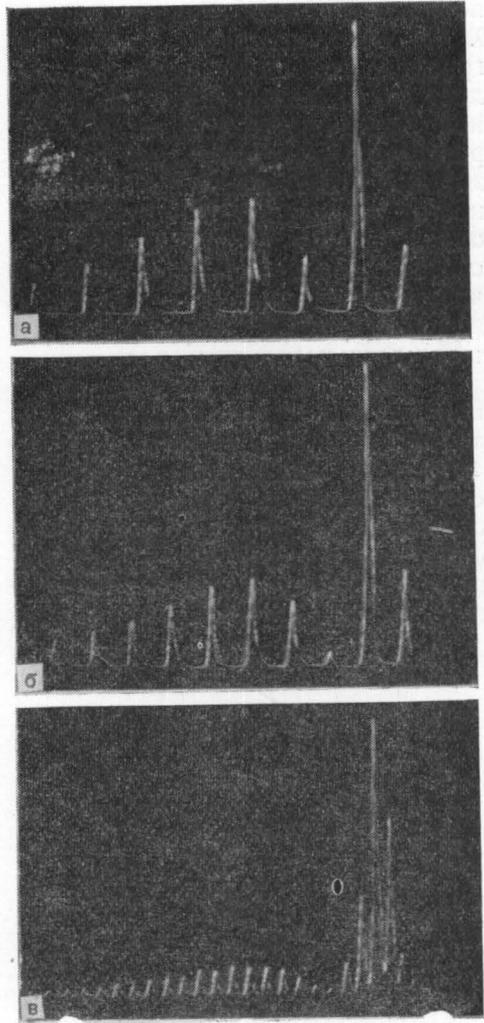


Рис. 4

ма (кривая 1) и его рост с уменьшением расстройки парциальных частот (см. спектрограммы биений, рис. 4а, б, в). По аналогичным причинам 2-й максимум находится вблизи парциальной частоты менее мощного генератора (кривая 2) и уменьшается до нуля при приближении к полосе синхронизации.

### Взаимная синхронизация квазиидентичных генераторов ( $n/s \approx 1, s = 1$ )

Расчет спектрального состава колебаний при значительном сближении мощностей взаимодействующих генераторов показал, что для

расстроек, много больших полосы синхронизации, т. е. порядка  $|\Delta| \sim \alpha$ ; частота биений  $\Omega \simeq |\Delta|$ ; спектральный состав колебаний в каждом из генераторов очень сложный. Изменение амплитуд спектральных составляющих в зависимости от расстройки описывается функциями Бесселя от аргумента  $\alpha/|\Delta|$ . Для расстроек  $|\Delta| \ll \alpha$ , т. е. расстроек порядка полосы синхронизации  $\lambda$  ( $\lambda \sim \alpha^2$ ), уравнение частот на границе полосы синхронизации дает два решения (в случае полной идентичности генераторов и равенства нулю затухания в связи), что соответствует возможности установления в системе одной из двух частот, близких к соответствующим нормальным частотам системы.

Эксперимент хорошо подтверждает результаты расчетов.

Частота биений остается равной расстройке парциальных частот вплоть до расстроек  $|\Delta| \simeq (2-3)\lambda$ , изменение амплитуд спектральных составляющих достаточно хорошо соответствует функциям Бесселя. В непосредственной близости к полосе синхронизации ни рассчитать, ни изме-

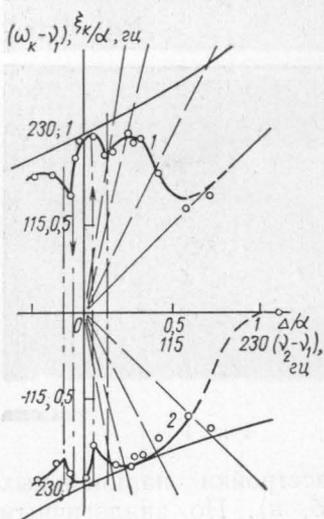


Рис. 5

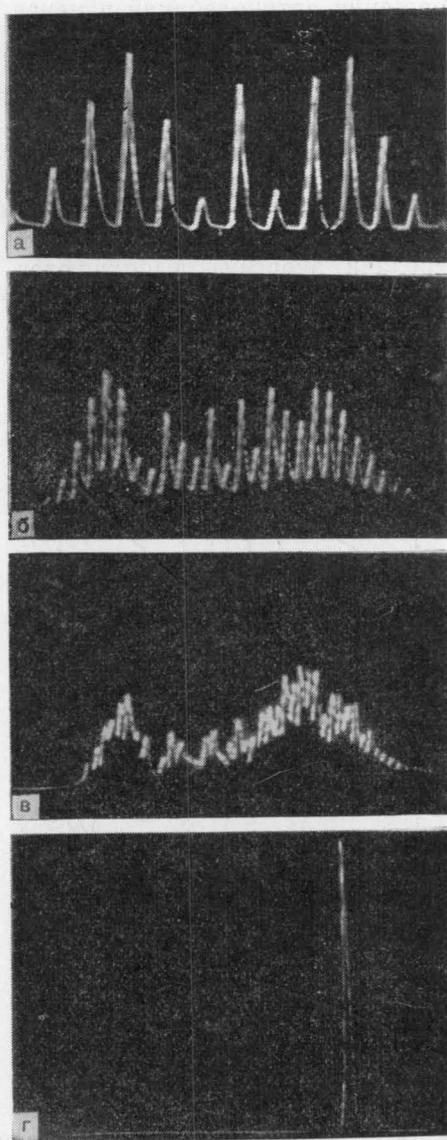


Рис. 6

рить спектральные компоненты колебаний в режиме биений не удалось, сам же спектр оставался достаточно сложным вплоть до расстроек, при которых устанавливался синхронный режим.

Вместе с тем по мере сближения мощностей генераторов при достаточно большой расстройке парциальных частот ( $|\Delta| \sim \alpha$ ) максимумы на спектрограмме биений сравниваются по величине; для расстроек

$|\Delta| \sim \alpha$  эти максимумы близки к парциальным частотам генераторов  $A$  и  $B$  и с уменьшением расстройки все более приближаются к нормальным частотам, оставаясь всегда между соответствующими парциальными и нормальными частотами. Экспериментальные кривые «максимумов» (1 и 2) приведены на рис. 5. У границы полосы синхронизации один из максимумов уменьшается (см. рис. 6), что свидетельствует о нарушении условий поддержания колебаний на частоте, близкой к соответствующей нормальной, и полностью соответствует развитому в работе [9] представлению о роли подавления в процессах синхронизации томсоновских систем.

### § 3. Системы с мягким ограничением амплитуд

Экспериментальное изучение процессов синхронизации систем с мягким ограничением амплитудных отклонений показало хорошее

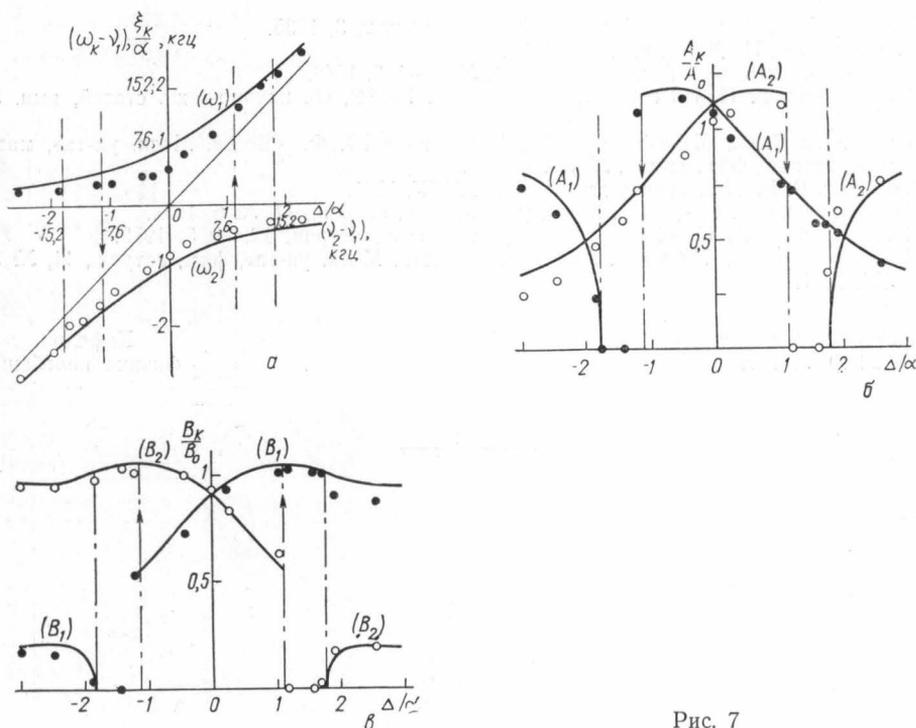


Рис. 7

согласие с теорией. Спектр колебаний в режиме биений в этом случае состоит из двух основных составляющих, частоты которых практически равны нормальным при данной расстройке. Внутри полосы синхронизации устанавливаются синхронные колебания с частотой, которая соответствует графику Вина; эффективное затухание внутри полосы синхронизации приводит к сближению нормальных частот с парциальными, тем больше, чем более различны по мощности взаимодействующие генераторы.

При расстройках порядка полосы синхронизации амплитуды колебаний в каждом из генераторов хорошо соответствуют их квазиконсервативному расчету. Внутри полосы синхронизации (при очень малых расстройках парциальных частот) подобное соответствие наблюдается

лишь для генераторов, не слишком отличающихся по мощности (см. работу [7]). На рис. 7 приведены результаты экспериментов для  $n=1,5$ ;  $s=1$  и  $\alpha=1,4\%$ ;  $M=n$  ( $a$ — частоты спектральных составляющих колебаний,  $b$  — амплитуды колебаний в менее мощном генераторе  $A$ ,  $c$  — амплитуды колебаний в более мощном генераторе  $B$ ). Случай направленной связи ( $n=1, s=0$ ) см. в [8].

В заключение отметим, что независимо от характера ограничения амплитуд в системах томсоновского типа синхронный режим наступает в результате подавления собственных колебаний в одном из генераторов (в менее мощном генераторе) за счет роста амплитуды воздействия и соответствующего ухудшения энергетических условий поддержания автоколебательного процесса в этом генераторе.

Благодарю проф. В. В. Мигулина за предложенную тему и постоянное внимание к работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Майер А. Г. Горьковский ун-т, «Уч.-зап.», вып. 2, 3, 1935.
2. Гапонов В. И. ЖТФ, 6, 5, 801, 1936.
3. Теодорчик К. Ф. «Радиотехника», 1, № 3—4, 3, 1946.
4. Рапопорт Г. Н. Ин-т электротехники АН УССР, сб. научно-техн. статей, вып. 3, 11, 1949.
5. Балтина Г. С., Есафов Н. И., Тихонов Ю. Ф. «Вестн. Моск. ун-та», мат., мех., астрон., физ., химия, № 2, 79, 1952.
6. Хохлов Р. В. Докторская диссертация. МГУ, 1961.
7. Коваленко А. С. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., 11, № 6, 1971.
8. Коваленко А. С. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., 12, № 5, 1972.
9. Мигулин В. В., Коваленко А. С. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., 11, № 3, 314, 1971.

Поступила в редакцию  
21.10 1971 г.

Кафедра  
физики колебаний