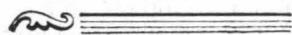


Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА



№ 6 — 1963



В. И. МЕДВЕДЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В СЛУЧАЕ НЕКОГЕРЕНТНЫХ СИГНАЛОВ

Рассмотрен и обоснован стробоскопический метод измерения изменения разности фаз между стабильными по частоте некогерентными сигналами со значительной расстройкой по частоте. Результаты эксперимента подтверждают возможность проведения таким способом фазовых измерений между некогерентными сигналами.

Введение

Фазовые (радиоинтерференционные) методы измерений электрических и неэлектрических величин находят в последнее время широкое применение в экспериментальной физике и технике [1—9]. Известно, что если эксперимент проводится таким образом, что измеряется время протекания исследуемого явления и это явление может быть связано с гармоническими сигналами, то фазовые методы измерений являются наиболее прямыми и отличаются высокой точностью.

В основу большинства фазометрических систем положен метод измерения изменения сдвига фаз между двумя или более *когерентными* сигналами путем измерения результата интерференции между ними. Этот метод, как известно, был предложен, обоснован и внедрен в экспериментальную радиофизику и технику академиками Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси и их ближайшими сотрудниками и учениками [1, 2].

В радиодиапазоне, как отмечалось [1, 2], можно довольно легко получить интерференционную картину от двух независимых источников колебаний. Однако такая картина практически нестабильна во времени и не позволяет проводить длительных измерений изменения разности фаз $\Delta\varphi_{\text{изм}}$ между этими колебаниями. Поэтому при проведении с помощью интерференционной методики прецизионных и длительных измерений изменения разности фаз ($\Delta\varphi_{\text{изм}}$) между колебаниями для обеспечения их когерентности требуется либо взаимная синхронизация [1, 2, 12] нескольких источников колебаний (часто на гармониках сигнала более низкой частоты, так что $\omega_1 = n\omega$; $\omega_2 = m\omega$; n и m — целые числа, обычно 2, 3, 4), либо использование одного общего задающего генератора с последующим разделением его сигналов [3—9]. В этом случае в пространстве или на индикаторе (например, экране электронно-лучевой трубки) получается устойчивая (теоретически неограниченно

долго) интерференционная картина, которая позволяет проводить измерения при условии

$$\Delta\omega\Delta t_{\text{изм}} \ll \Delta\varphi_{\text{изм}}, \quad (1)$$

где $\Delta\omega\Delta t_{\text{изм}}$ — паразитный сдвиг фазы за время наблюдения.

Из-за прохождения сравниваемых по фазе сигналов через различные линейные и нелинейные устройства фазометрической аппаратуры с флуктуирующими параметрами возникают технические и шумовые паразитные фазовые погрешности, которые часто приводят к тому, что исходные сравниваемые по фазе когерентные сигналы на выходе системы становятся некогерентными и условие (1) для них перестает быть справедливым. В этом случае, строго говоря, фазовые измерения теряют смысл, если не использовать некоторые специальные методы измерений. В последнее время проведен ряд исследований [10—14], в которых, с одной стороны, рассмотрены источники паразитных сдвигов фаз в фазометрических системах, с другой — предложены эффективные способы снижения таких паразитных сдвигов фаз, а также исследованы возможности проведения измерений малых сдвигов фаз на фоне больших аппаратурных сдвигов фаз случайного происхождения.

Однако требование когерентности исходных сигналов для проведения фазовых измерений, как будет показано ниже, не является обязательным. Кроме того, требование когерентности сигналов, по-видимому, ограничивает класс фазовых измерений или технически, усложняет некоторые фазометрические системы, как, например, в опытах по измерению расстояний с помощью радиоинтерферометров [1, 2], когда используется взаимная синхронизация сигналов нескольких удаленных друг от друга станций, для чего необходимы достаточно мощные передатчики, чувствительные приемники, приемные и передающие антенны и т. д.

Обоснование метода

Рассмотрим методику наблюдения и измерения фазовых сдвигов между некогерентными колебаниями с определенной расстройкой по частоте $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$, для которых в силу этого изменение разности фаз в процессе эксперимента может значительно превосходить $\Delta\varphi_{\text{изм}}$, т. е.

$$\Delta\omega\Delta t_{\text{изм}} \gg \Delta\varphi_{\text{изм}}. \quad (2)$$

Возможность измерения $\Delta\varphi_{\text{изм}}$ в условиях (2) основана на том, что интерференционная картина в любой точке пространства или ее изображение на экране электронно-лучевой трубки в качестве индикатора периодически повторяется с периодом $T = \frac{2\pi}{\omega_1 - \omega_2}$. Включая индикатор на короткие промежутки времени τ через строго определенные интервалы времени $T = \frac{2\pi}{\omega_1 - \omega_2}$, можно на индикаторе наблюдать устойчивую интерференционную картину.

Начало отсчета (сдвиг фазы между сигналами в первоначальные моменты наблюдения) устанавливается здесь произвольно, как, впрочем, и в большинстве известных фазометрических систем с когерентными сигналами. Если при этом фаза одного из колебаний, участвующих в интерференции, изменится, то это приведет к изменению интерференционной картины, позволяя таким образом зарегистрировать происшедший сдвиг фазы $\Delta\varphi_{\text{изм}}$ (рис. 1). Действительно, введение какого-либо сдвига фазы $\Delta\varphi_{\text{изм}}$ на пути одного из

сигналов, например сигнала с частотой ω_1 , равносильно запаздыванию этого сигнала на $\Delta\varphi_{изм}$. Если считать смеситель, выделяющий сигнал разностной частоты ($\omega_1 - \omega_2$), линейным, то на $\Delta\varphi_{изм}$ изменится и фаза колебания разностной частоты, а следовательно, и начало формирования импульса подсветки. Таким образом, начало этих импульсов как бы

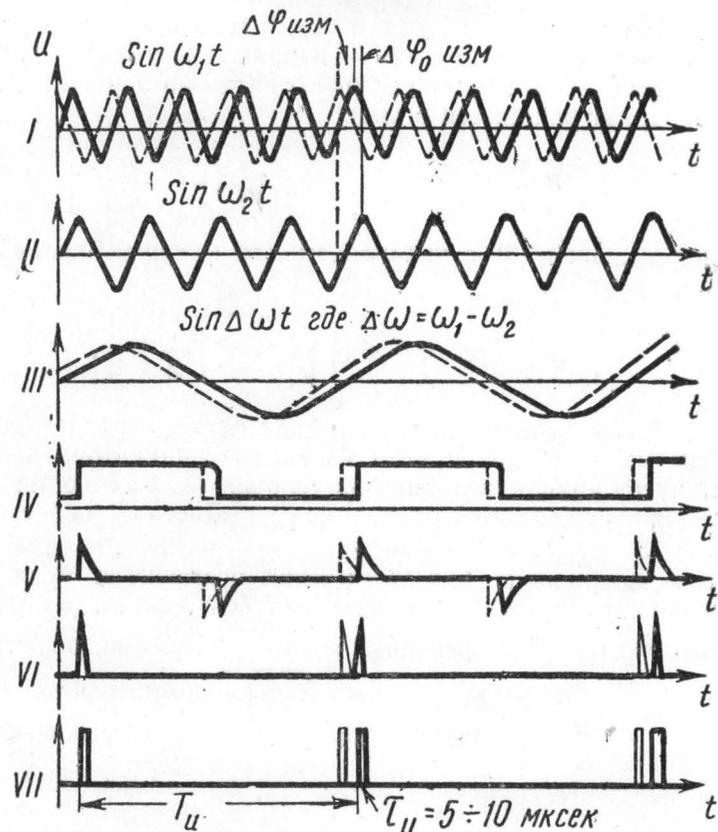


Рис. 1. Эпюры напряжений для иллюстрации метода фазовых измерений в случае некогерентных сигналов

привязано к фазе одного из сигналов. Второй сигнал служит опорным сигналом, относительно которого измеряется $\Delta\varphi_{изм}$. Предлагаемый метод по существу является методом фазового стробоскопирования.

Время единичного наблюдения τ (длительность стробов) должно быть, естественно, таким, чтобы за это время не обнаружилось изменение интерференционной картины на индикаторе, т. е.

$$\Delta\omega\tau < \Delta\varphi_{0\text{мин}} \quad (3)$$

где $\Delta\varphi_{0\text{мин}}$ — разрешающая способность фазового индикатора, определяемая по известным формулам [15]. Соотношение (3) является основой данной методики и устанавливает связь между $\Delta\omega$, τ и $\Delta\varphi_{0\text{мин}}$. Связь между τ и T из (3) можно выразить в более наглядном виде

$$\tau \leq \left[\frac{\Delta\varphi_{0\text{мин}}}{2\pi} \right] T. \quad (4)$$

Максимально допустимая расстройка между сигналами $\Delta\omega_{\text{макс}}$ обратно пропорциональна минимальной длительности стробов ($\tau_{\text{мин}}$) и пропорциональна разрешающей способности индикатора, т. е.

$$\Delta\omega_{\text{макс}} \leq \frac{\Delta\Phi_{\text{о мин}}}{\tau_{\text{мин}}}. \quad (5)$$

Если к отклоняющим пластинам «х» индикатора приложено напряжение $x = A \sin \omega_1 t$, к пластинам «у» — напряжение $y = B \sin(\omega_2 t + \varphi)$, то можно показать, что движение светового пятна на экране в декартовой системе координат запишется в виде

$$y = B \frac{\omega_2}{\omega_1} \left[\frac{x}{A} \cos \varphi + \sin \varphi \sqrt{1 - \left(\frac{x}{A}\right)^2} \right]. \quad (6)$$

Сравнивая уравнение (6) с уравнением для фигуры Лиссажу первого порядка ($\omega_1 = \omega_2$) [15]

$$y = B \left[\frac{x}{A} \cos \varphi + \sin \varphi \sqrt{1 - \left(\frac{x}{A}\right)^2} \right], \quad (7)$$

замечаем, что при небольших расстройках $\omega_1 \approx \omega_2$ уравнение (6) переходит в уравнение (7). При этом на экране индикатора наблюдается почти замкнутая кривая, которая при условии (3) с точностью до ошибки измерения $\Delta\Phi_{\text{о мин}}$ соответствует фигуре Лиссажу первого порядка (эллипс), позволяя по известным формулам вычислять $\Delta\Phi_{\text{визм}}$.

Как отмечалось выше, для обеспечения постоянства нуля в течение всего эксперимента необходимо включать стробы каждый раз через строго определенные промежутки времени $T = \frac{2\pi}{\omega_1 - \omega_2}$. Очевидно, что стабильность величины T определяется стабильностью частот ω_1 и ω_2 . Если через $k_1 = \frac{\delta f_1}{f_1}$ и $k_2 = \frac{\delta f_2}{f_2}$ обозначить коэффициенты нестабильности частот соответствующих генераторов, через $T_1 = \frac{1}{(f_1 - f_2)} = \frac{1}{\Delta f}$ и $T_2 = \frac{1}{\Delta f + \delta f_1 + \delta f_2}$ — периоды повторения стробов соответственно без ухода частоты и при максимальном уходе частоты, то можно записать очевидное соотношение

$$\delta T = |T_1 - T_2| \leq \tau. \quad (8)$$

Если в неравенстве (8) выразить T_1 , T_2 и τ через соответствующие им величины (τ из соотношения [4]), то получим

$$\frac{\delta f_1 + \delta f_2}{\Delta f + \delta f_1 + \delta f_2} \leq \frac{\Delta\Phi_{\text{о мин}}}{2\pi}. \quad (9)$$

Соотношение (9) с учетом $\delta f_1 = k_1 f_1$; $\delta f_2 = k_2 f_2$; $\Delta f = |f_1 - f_2|$ можно преобразовать к виду

$$\frac{k_1 f_1 + k_2 f_2}{|f_1 - f_2| + k_1 f_1 + k_2 f_2} \leq \frac{\Delta\Phi_{\text{о мин}}}{2\pi}, \quad (10)$$

которое в случае равенства $k_1 = k_2 = k$ примет вид

$$k \leq \frac{|f_1 - f_2|}{f_1 + f_2} \frac{\Delta\Phi_{\text{о мин}}}{2\pi + \Delta\Phi_{\text{о мин}}}. \quad (11)$$

Из выражения (11) в частности следует, что при $f_1 = f_2$ коэффициенты неустойчивости двух генераторов должны равняться нулю (абсолютно стабильные генераторы), чтобы интерференционная картина была стабильна во времени (фиксированное положение нуля счисления). Требуемая стабильность генераторов за конечное время эксперимента может быть вычислена на основании (11) с учетом конечного числа периодов повторения.

Эксперимент

Экспериментальная проверка возможности проведения фазовых измерений в случае некогерентных сигналов осуществлена с помощью установки, блок-схема которой приведена на рис. 2. Сигналы от двух независимых генераторов ГСС-6 с определенной расстройкой по частоте подавались на смеситель, в котором выделялся сигнал разностной частоты, который после фильтрации поступал в канал формирования подсвечивающих стробов (ждуший мультивибратор, дифференцирующая цепочка, усилитель-ограничитель и триггер). Стробы подавались

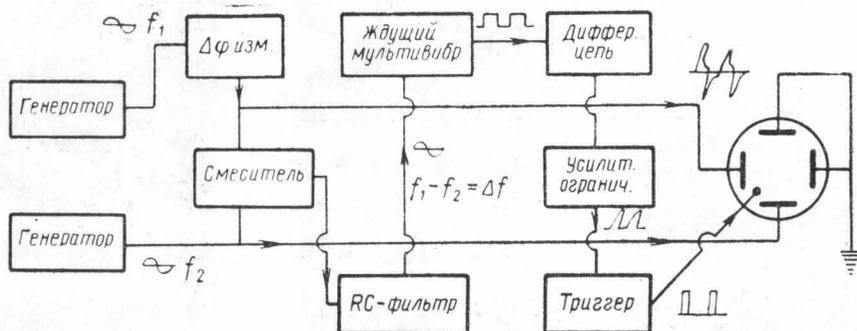


Рис. 2. Блок-схема фазометрического устройства

на управляющий электрод осциллографа ИО-4. На пластины осциллографа подавались колебания с частотами f_1 и f_2 ($f_1 \neq f_2$). На экране осциллографа при этом наблюдались изображения, показанные на рис. 3.

Проведена экспериментальная проверка основного соотношения (3) рассматриваемой методики. На рис. 4 представлена зависимость разрешающей способности такого фазометра $\Delta\varphi_{\text{мин}}$ от величины расстройки частоты между сигналами $\Delta f = 100-5000$ гц ($f_1 \sim f_2 \sim 10^5$ гц) при $\tau = \text{const} = 20$ мсек. График показывает небольшой рост $\Delta\varphi_{\text{мин}}$ по линейному закону от Δf при $\tau = \text{const}$, что согласуется с выражением (3) и связано с тем, что при больших Δf скорость поворота интерференционной картины возрастала, что приводило к тому, что фигура Лиссажу начинала выходить за свои «естественные» границы, определяемые исходной разрешающей способностью индикатора (рис. 5).

Зависимость $\Delta\varphi_{\text{мин}}$ от τ при значениях расстроек $\Delta f_1 = 425$ гц, $\Delta f_2 = 1005$ гц и $\Delta f_3 = 3650$ гц показана на рис. 6. Начальные участки кривых на этих графиках также можно аппроксимировать линейными зависимостями. Соответствующие осциллограммы приведены на рис. 7.

В работе проведено также сравнение расчетных значений сдвигов фаз ($\Delta\varphi_{\text{расч}}$), вносимых с помощью градуированного фазовращателя в канал сигнала с частотой f_1 , с экспериментально измеренными значениями $\Delta\varphi_{\text{изм}}$ для нескольких значений расстройки Δf . Результаты сравнений $\Delta\varphi_{\text{изм}}$ с $\Delta\varphi_{\text{расч}}$ приведены на рис. 8 и показывают удовлетворительное совпадение с точностью до ошибки измерений $\Delta\varphi_{\text{мин}}$.

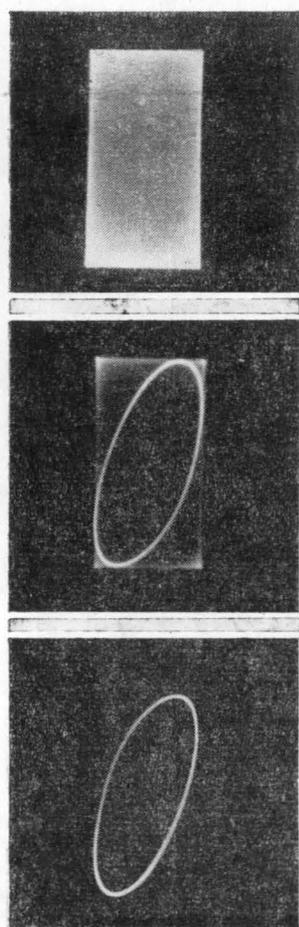


Рис. 3. Осциллограммы изображения на индикаторе фазометра для некогерентных сигналов: *а* — изображение на экране незапертой трубки в отсутствие подсвечивающих импульсов, *б* — изображение на экране подзапертой трубки при действии подсвечивающих импульсов, *в* — изображение на экране запертой трубки при ее отпирании только подсвечивающими импульсами

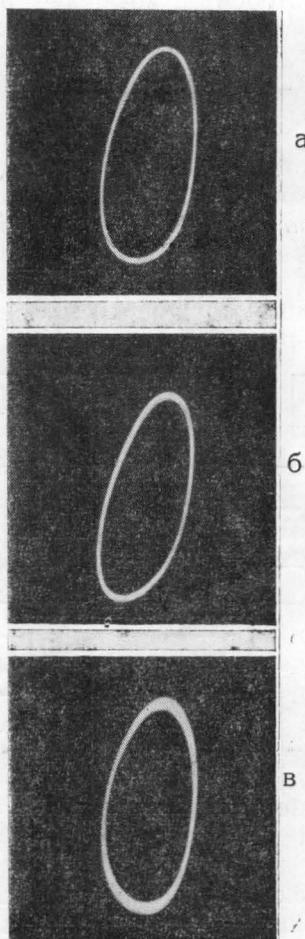


Рис. 5. Осциллограммы, иллюстрирующие зависимость разрешающей способности $\Delta\Phi_{\text{мин}}$ фазометра для некогерентных сигналов от Δf при постоянной длительности подсвечивающих импульсов ($\tau=20$ мксек): *а* — $\Delta f=220$ гц, *б* — $\Delta f=1005$ гц, *в* — $\Delta f=2690$ гц

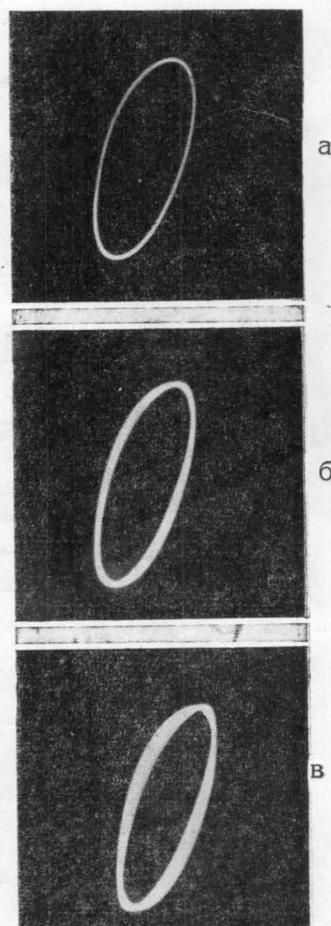


Рис. 7. Осциллограммы, иллюстрирующие зависимость разрешающей способности $\Delta\Phi_{\text{мин}}$ фазометра для некогерентных сигналов от τ при $\Delta f=1610$ гц, *а* — $\tau=10$ мксек, *б* — $\tau=60$ мксек, *в* — $\tau=100$ мксек

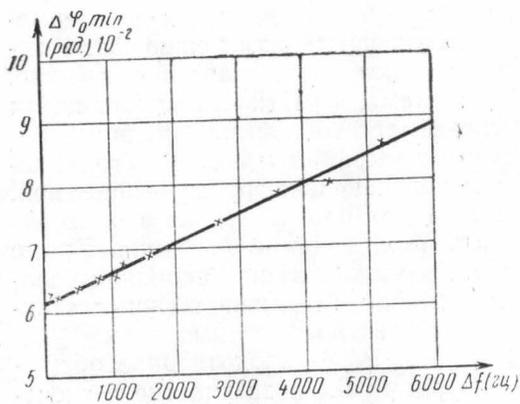


Рис. 4. Зависимость разрешающей способности $\Delta\Phi_{\text{мин}}$ фазометра для некогерентных сигналов от расстройки Δf при постоянной длительности подсвечивающих импульсов ($\tau = \text{const} = 20$ мксек)

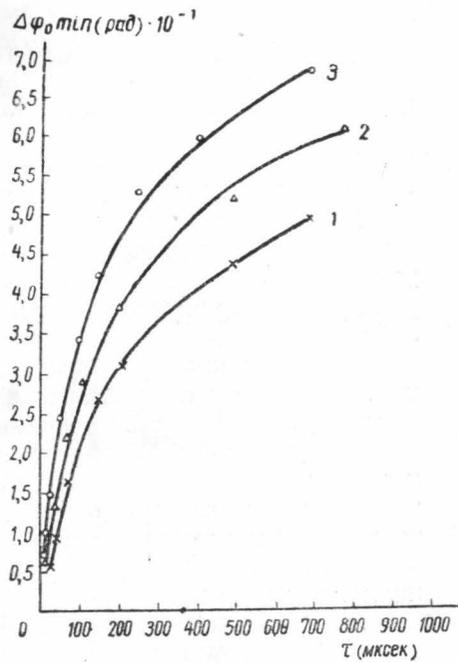


Рис. 6. Зависимость разрешающей способности $\Delta\Phi_{\text{мин}}$ фазометра для некогерентных сигналов от длительности τ подсвечивающих импульсов; 1 — $\Delta f = 425$ гц, 2 — $\Delta f = 1005$ гц, 3 — $\Delta f = 3650$ гц

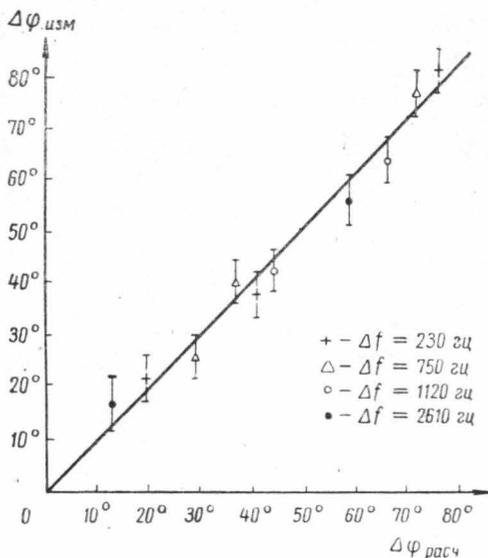


Рис. 8. Сравнение измеренных ($\Delta\Phi_{\text{изм}}$) значений сдвигов фаз между некогерентными сигналами с расчетными величинами ($\Delta\Phi_{\text{расч}}$)

Выводы

Результаты анализа и экспериментального исследования стробоскопического метода наблюдения и регистрации фазовых сдвигов между сигналами с конечной расстройкой по частоте подтверждают возможность проведения измерений фазовых сдвигов между некогерентными колебаниями. Предложенная методика основана на строго периодическом характере изменения результата интерференции таких колебаний в пространстве или на индикаторе с частотой, равной разностной частоте этих колебаний; изменение фазы одного из участвующих в интерференции колебаний приводит к соответствующему изменению фазы колебания разностной частоты, которое может быть зарегистрировано.

Рассмотренная фазометрическая система, в частности, может найти применение при определении изменения расстояний между двумя радиостанциями (вариант «перемещающегося» радиоинтерферометра), когда одна из станций является только передающей, другая — приемной, причем частота передающей станции может отличаться на некоторую величину от частоты опорного генератора приемной станции. Кроме того, такая методика может быть использована для исследования условий распространения электромагнитных волн (при неподвижных станциях), а также при измерении скорости электромагнитных волн.

Автор благодарен проф. Мигулину В. В. за плодотворное обсуждение результатов работы, а также Бурдину Б. А. за участие в эксперименте.

ЛИТЕРАТУРА

1. «Новейшие исследования распространения радиоволн вдоль земной поверхности». Сб. статей под редакцией акад. Л. И. Мандельштама и акад. Н. Д. Папалекси, 1945.
2. Мигулин В. В. «Успехи физических наук», **33**, № 3, 353, 1947.
3. Bergstrand E. Ark. f. Fysik., **2**, 119, 1950.
4. Karolus A., Fries D. Ann. d. Phys., **4**, **HI-5**, 269, 1959.
5. Галанин М. Д. ДАН СССР, **73**, 925, 1950.
6. Бернштейн И. Л. ДАН СССР, **75**, № 5, 635, 1950.
7. Медведев В. И. Физика диэлектриков, сб. статей. Изд-во АН СССР, 1958, 158.
8. Beckmann V. Nachrichtentechn. Zeitschr., **12**, Nr. 335, 1959.
9. Корнилов А. П., Хрюкин В. С. «Приборы и техника эксперимента», № 2, 128, 1959.
10. Бонч-Бруевич А. М., Широков В. И. ЖТФ, **25**, вып. 10, 1825, 1955.
11. Жаботинский М. Е., Сверчков Е. И. «Приборы и техника эксперимента», № 3, 74, 1956.
12. Медведев В. И. «Вестн. Моск. ун-та, сер. мех., мат., астроном., физ., химии», № 6, 112, 1959.
13. Свердлов Ю. Л. «Радиотехника и электроника», **4**, № 6, 951, 1959.
14. Медведев В. И., Лоскутов Б. П. «Вестн. Моск. ун-та», сер. физики, астрономии, № 1, 27, 1960.
15. Асеев Б. П. Фазовые соотношения в радиотехнике. Изд-во Связьиздат, М., 1959.

Поступила в редакцию
4. 4 1963 г.

Кафедра
теории колебаний