

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСИИ ОДНОСТУПЕНЧАТЫХ ШТЫРЕВЫХ ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

*В. М. Дашенков*

В работе приводятся результаты экспериментального исследования дисперсии нескольких новых штыревых замедляющих систем. Экспериментальные дисперсионные характеристики удовлетворительно согласуются с расчетными данными.

Теоретическое исследование дисперсии одноступенчатых штыревых систем типов „S“, „M“ и „C“ дано в [1] и более подробно в [2]. Поскольку в литературе, посвященной штыревым структурам [3–6], отсутствуют сведения о системах „M“ и „C“, то представлялось целесообразным для проверки теоретического анализа провести экспериментальное исследование этих систем.

Исследование проводилось на моделях, удобных для расчетов и простых в конструктивном отношении. Во всех случаях дисперсия исследовалась только в первой низкочастотной полосе пропускания. Определение замедления производилось обычным способом — путем измерения длины стоячих волн, возникающих в системе, состоящей из конечного числа штырей.

### 1. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ «M»

Одна из систем типа „M“ была исследована в двух вариантах. В первом из них система представляла 19 круглых штырей, припаянных одним концом к металлической короткозамыкающей плоскости и соединенных друг с другом емкостями  $C_M = 4 \text{ пф}$  на другом конце (система (а) на рис. 1)\*. Во втором варианте вместо металлической плоскости использовались перемычки того же диаметра, что и сами штыри (система (б) на рис. 1).

Дисперсионное уравнение этих систем в предположении, что на одном из концов штыри короткозамкнуты между собой, имеет вид

$$\operatorname{ctg} \beta l = \omega C_M K_{\text{эKB}}(\psi), \quad (1)$$

где  $K_{\text{эKB}}(\psi)$  определяется формулой

$$K_{\text{эKB}}(\psi) = 120 [\ln(D_{12}/r) - \ln(D_{12}/2r) \cos \psi - \sum_{k=2}^{\infty} \cos k\psi \ln k^2(k^2 - 1)^{-1}], \quad (2)$$

вывод которой дан в приложении. Здесь  $l$  — длина штырей,  $\omega$  — круговая частота,  $\psi$  — фазовый сдвиг волны между соседними штырями системы, а  $\beta = \omega/c$ , где  $c$  — скорость света в свободном пространстве. Величины  $D_{12}$  и  $r$  пояснены в приложении.

Результаты расчета по формулам (1) и (2) (с учетом в (2) семи первых членов ряда), а также экспериментальные зависимости

\* В качестве емкостных нагрузок у систем „M“ и „C“ использовались керамические конденсаторы, емкость которых замерялась на Q-метре с точностью  $\pm 0,1 \text{ пф}$ .

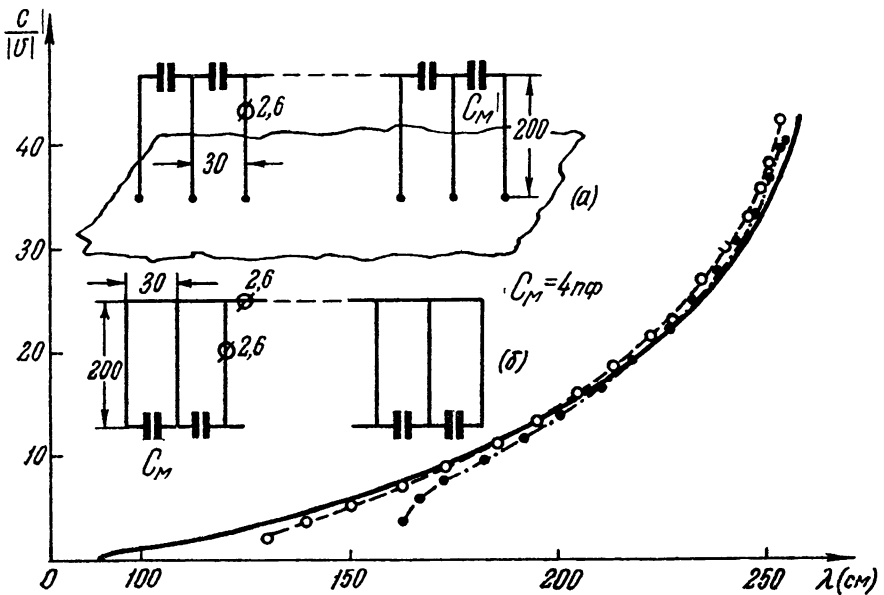


Рис. 1. Дисперсионные зависимости системы „М\*“:

— теоретическая кривая, - - - экспериментальная кривая системы (а), - - - экспериментальная кривая системы (б).

замедления в функции длины волны возбуждения  $\lambda$  представлены на рис. 1\*. Дисперсия обеих систем отрицательная (фазовая скорость  $v < 0$ ).

Полоса пропускания системы (б) оказывается уже, чем у системы (а). Это объясняется влиянием индуктивности замыкающих перемычек и подтверждает результаты теоретического анализа, согласно которому полоса пропускания делается уже, если на одном из концов штырей равные нулю сопротивления нагрузок заменяются некоторыми (пусть даже малыми) индуктивными сопротивлениями.

Так как перемычки, соединяющие штыри, являются некоторыми эквивалентными индуктивностями, то этим обстоятельством можно воспользоваться для создания чрезвычайно простой в конструктивном отношении системы, изображенной на рис. 2. Из [1] и [2] следует, что система „М“ с индуктивными нагрузками обладает положительной дисперсией, и ее первая полоса пропускания расположена в сторону длинных волн от  $\lambda = 2l$ . Экспериментальные данные полностью подтверждают этот вывод (см. рис. 2). Количественный расчет системы не производился, так как точный учет величин индуктивностей замыкающих перемычек представляет достаточно сложную задачу.

На рис. 3 изображена симметричная относительно плоскости среднего сечения система со штырями разной формы в средней и боковых частях. Из соображений симметрии ясно, что в первой полосе пропускания в плоскости среднего сечения располагаются узел тока и пучность напряжения. Это дает возможность изучать только одну половину системы. Рассматривая широкие и близко расположенные пластины средней части как некоторые эквивалент-

\* Максимальная ошибка в определении  $K_{\text{эвб}}(\psi)$  с учетом конечного числа членов ряда получается при  $\psi = 0$ , а минимальная — при  $\psi = \pi$ . Учет семи членов ряда дает соответствующие значения ошибки, равные 13,55 и 0,9 о.м., учет пяти членов — 18,5 и 1,7 о.м., а трех членов — 26,7 и 2,1 о.м. Точные же значения сопротивления  $K_{\text{эвб}}(\psi)$  при  $\psi = 0$  и  $\psi = \pi$  равны  $K_{\text{эвб}}(0) = 0$  и  $K_{\text{эвб}}(\pi) = 240 \ln(2D_{12}/\pi r)$ .

ные емкости, включенные между концами соседних круглых штырей, приходим к выводу о подобии данной системы системе (а), изображенной на рис. 1.

Дисперсионное уравнение рассматриваемой структуры имеет такой же вид, как и для лестничных систем [4]:

$$K(\psi) \operatorname{ctg}(\beta l/2) = K_1(\psi) \operatorname{tg} \beta d, \quad (3)$$

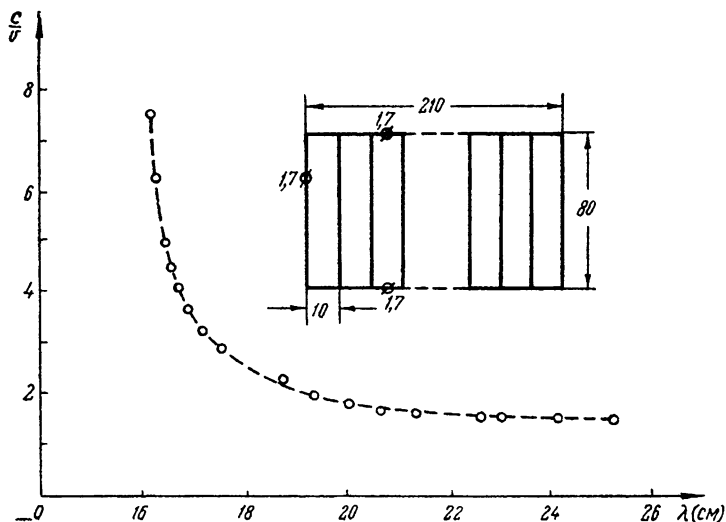


Рис. 2. Система „М“ с перемычками и ее экспериментальная дисперсионная кривая.

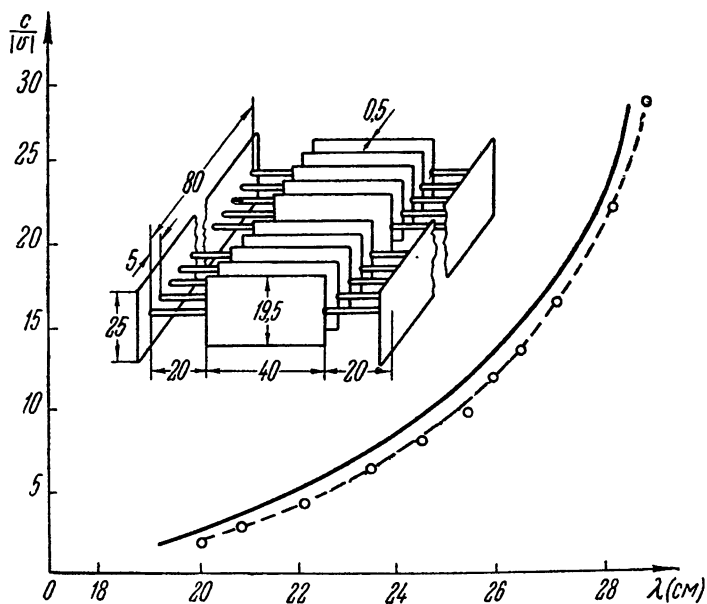


Рис. 3. Симметричная система со штырями неодинакового поперечного сечения и ее дисперсионные кривые:

— теоретическая, — — — экспериментальная.

где  $K(\psi)$  и  $K_1(\psi)$  — характеристические сопротивления, а  $l$  и  $d$  — длины средней и боковых частей системы. При расчете дисперсии величина  $K_1(\psi)$  в уравнении (3) определялась из соотношения [1]

$$K_1(\psi) = K_{\text{эКВ}}(\psi)/4\sin^2(\psi/2),$$

где  $K_{\text{эв}}(\psi)$  рассчитывалось по формуле (2) с учетом семи членов ряда. Характеристическое сопротивление пластин средней части  $K(\psi)$  определялось по специальным таблицам, составленным инженером И. Ш. Белугой и любезно представленным им в распоряжение автора.

Экспериментальная и расчетная дисперсионные кривые системы приведены на рис. 3. Небольшие расхождения между ними объясняются, по-видимому, погрешностями теоретического расчета, связанными с тем, что формула (3) не учитывает краевых эффектов на стыках круглых штырей с пластинами. Сравнивая дисперсионные кривые данной системы и системы (а) на рис. 1, убеждаемся в их подобии, что является следствием отмеченного выше подобия самих систем.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ «С»

Первая из исследованных систем типа „С“, схематически изображенная на рис. 4, представляет цепочку из 10 двухпроводных линий, на одном конце короткозамкнутых, на другом — соединенных конденсаторами  $C_M = 4 \text{ нФ}$ . С точки зрения расчета данная система эквивалентна системе „С“, изображенной на рис. 2 работы [1], при условии, что  $Y_{SI} = Y_{MII} = 0$ ,  $Y_{SII} = \infty$ ,  $Y_{MI} = j\omega C_M$ , а расстояния штырей до „земли“ равны половине расстояния между центрами проводников каждой линии.

Дисперсионное уравнение системы имеет вид

$$\text{ctg } \beta l = 4 \sin^2(\psi/2) K(\psi) \omega C_M, \quad (5)$$

где

$$K(\psi) = c^{-1} (\alpha_{11} + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_{1,k+1} \cos k \psi). \quad (6)$$

При расчете дисперсионной кривой в формуле (6) учитывались семь первых членов ряда, причем потенциальные коэффициенты  $\alpha_{ik}$  определялись по формулам (9) приложения. Результаты расчета и эксперимента приведены на рис. 4.

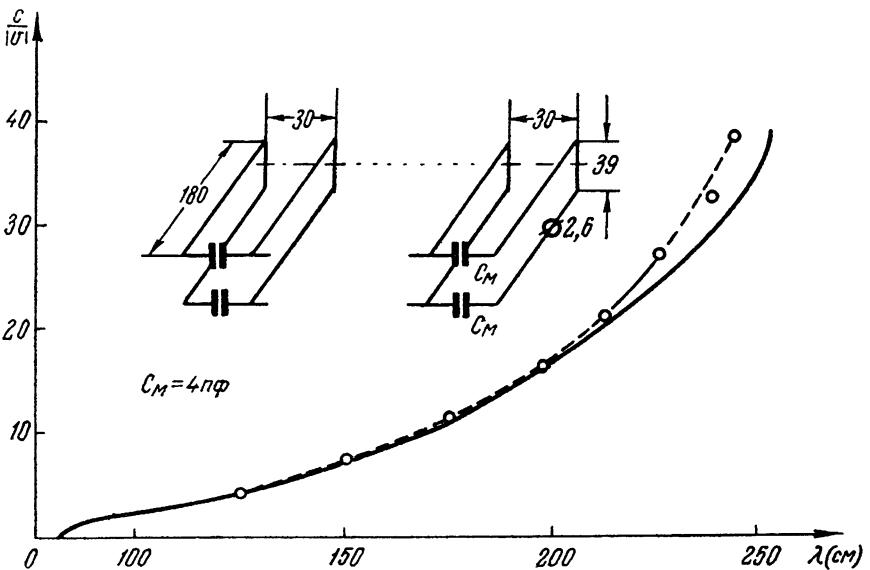


Рис. 4. Дисперсионные кривые системы „С“:  
 ————— теоретическая,    - - - экспериментальная.

Вторая система типа „С“, изображенная на рис. 5, состояла из 10 двухпроводных линий, на одном конце нагруженных конденсаторами  $C_S$  и  $C_M$ , а на другом конце — короткозамкнутых. Теоретическая (а) и экспериментальная (б) кривые свидетельствуют о том, что дисперсия системы отрицательная.

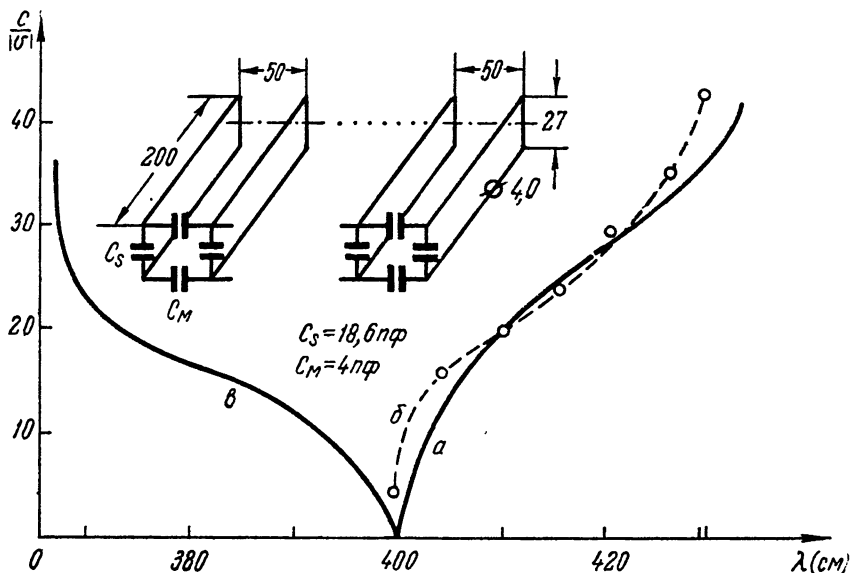


Рис. 5. Дисперсионные кривые системы „С“:

а — теоретическая, б — экспериментальная, в — теоретическая системы „S“ (система „С“ при  $C_M = 0$ ).

При  $C_M$  данная система „С“ переходит в систему типа „S“, для которой на рис. 5 приведена теоретическая дисперсионная кривая (в). Сравнение кривых (а) и (в) в соответствии со сказанным в [1] показывает, что границы полос пропускания систем „С“ и „S“ при  $\psi = 0$  совпадают.

Экспериментальное исследование систем „М“ и „С“ подтверждает как качественные, так и количественные результаты теоретического анализа дисперсии этих систем. Проведенное исследование показывает, что системы типа „М“ являются достаточно широкополосными и, следовательно, в соответствующем конструктивном оформлении наряду с системами „S“ могут быть использованы на практике.

Автор выражает признательность В. А. Толстикovu и В. И. Калинину за обсуждение работы и ценные замечания.

#### ПРИЛОЖЕНИЕ. ВЫВОД ФОРМУЛЫ (2)

На основании [1]

$$K_{\text{эkv}}(\psi) = 4\sin^2(\psi/2) K(\psi), \quad (7)$$

где  $K(\psi)$  определяется формулой (6). Тогда

$$K_{\text{эkv}}(\psi) = 2c^{-1}(1 - \cos \psi) (\alpha_{11} + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_{1,k+1} \cos k \psi) = \quad (8)$$

$$= 2c^{-1} \left\{ (\alpha_{11} - \alpha_{12}) - \sum_{k=1}^{\infty} [(\alpha_{1,k} - \alpha_{1,k+1}) - (\alpha_{1,k+1} - \alpha_{1,k+2})] \cos k \psi \right\}.$$

Согласно [7], для круглых штырей без учета так называемого „эффекта близости“ в практической системе единиц

$$c^{-1}\alpha_{11} = 60 \ln(2D_{11}/r) \text{ ом}; \quad c^{-1}\alpha_{1,k} = 60 \ln\left(\sqrt{(4D_{11}^2 + D_{1,k}^2)}/D_{1,k}\right) \text{ ом}, \quad (9)$$

где  $D_{11}$  — высота расположения штырей над „землей“,  $r$  — их радиус, а  $D_{1,k}$  — расстояние между центрами 1-го и  $k$ -го штырей. Легко видеть, что при  $D_{11} \rightarrow \infty$

$$\frac{1}{c}(\alpha_{11} - \alpha_{12}) \rightarrow 60 \ln \frac{D_{12}}{r}, \quad (10)$$

$$\frac{1}{c}(\alpha_{1,k} - \alpha_{1,k+1}) \rightarrow 60 \ln \frac{D_{1,k+1}}{D_{1,k}} = 60 \ln \frac{k}{k-1}. \quad (11)$$

Подставляя (10) и (11) в (8), приходим к (2).

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. В. М. Дашенков, Изв. высш. уч. зав. — Радиопизика, 1, 3, 164 (1958).
2. В. М. Дашенков, Радиотехника и электроника, 4, 4 (1959).
3. R. C. Fletcher, Proc. IRE, 40, 951 (1952).
4. A. Leblond, G. Mourier, Ann. Radioelectr., 9, 180 (1954); Ann. Radioelectr., 9, 311 (1954).
5. И. Белуга, Техн. отчет МРТП СССР, № 53—1099, 1955.
6. J. R. Pierce, Trans. IRE, ED-2, 13 (1955).
7. К. А. Круг, Основы электротехники, Госэнергоиздат, М., 316, 1952.

Саратовский государственный университет

Поступила в редакцию  
29 мая 1958 г.