

УДК 537.632/.636:53.082.744

## ПРИМЕНИМОСТЬ ОДНОМОДОВОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ В ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ

© 2022 г. П. А. Иванов<sup>1, \*</sup>, С. Ю. Бобровский<sup>1</sup>, К. Н. Розанов<sup>1</sup>, Д. А. Петров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

“Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук”, Москва, Россия

\*E-mail: p.ivanov.a@mail.ru

Поступила в редакцию 13.12.2021 г.

После доработки 24.12.2021 г.

Принята к публикации 21.01.2022 г.

При помощи электродинамического моделирования исследована область применимости приближения поперечной электромагнитной волны при измерении магнитной проницаемости в симметричной и несимметричной полосковых линиях передачи. Показано, что при неоднородном заполнении сечения линии исследуемыми образцами возникает продольная компонента волны, которая приводит к существенной погрешности измерения.

DOI: 10.31857/S0367676522050088

### ВВЕДЕНИЕ

Использование полосковых линий передачи является перспективным методом измерения магнитных свойств материалов в широком диапазоне частот, так как у таких линий отсутствует частота отсечки, они просты в изготовлении, предоставляют широкие возможности по выбору их геометрии, размера, а также количества, формы и взаимного расположения проводящих элементов, что позволяет удовлетворить многим требованиям, которые устанавливаются к линиям передачи для широкополосного измерения как магнитных, так и диэлектрических свойств различных материалов.

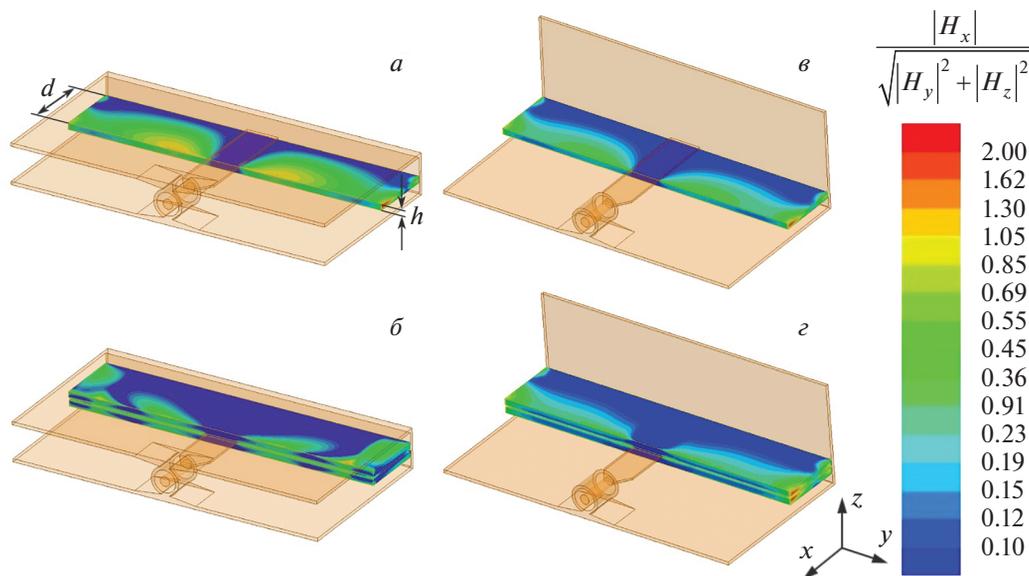
Часто на практике используют полосковую линию передачи с двумя металлическими экранами, а исследуемый образец изготавливают таким образом, чтобы он полностью заполнял поперечное сечение линии [1, 2]. В этом случае основным типом распространяющейся волны является ТЕМ-волна. При таком подходе для получения связи измеряемых S-параметров линии с магнитной и диэлектрической проницаемостью материала образца решается достаточно простая электродинамическая задача, которая не требует сложных и долгих вычислений. Однако в действительности далеко не всегда имеется возможность реализовать однородное заполнение, а наличие любых воздушных зазоров может значительно повлиять на результат [3]. При другом подходе поперечное сечение полосковой линии, которая может иметь как один, так и два экрана, заполняется неоднородно. Это позволяет проводить измерения образцов небольшого размера и избежать их предварительной механической обработки, что является значитель-

ным преимуществом. Обычно при неоднородном заполнении используется квази-ТЕМ приближение, при котором отличием структуры электромагнитной волны от поперечной пренебрегают. Такие измерения проводят с тонкими магнитными пленками [4, 5], ферритами [6] или объемными метаматериалами [7], что говорит о широте применения этого подхода. Существуют также методы измерения, использующие полный полевой анализ [8, 9], которые позволяют учесть распространение гибридных мод в полосковых линиях, но являются более строгими и аналитически сложными.

Задачей настоящей работы является изучение области применимости метода измерения на основе квази-ТЕМ приближения, что обусловлено необходимостью получения достоверных результатов измерения с минимальной погрешностью.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе проведено численное моделирование полосковых измерительных ячеек (рис. 1) при помощи программной среды электродинамического моделирования FEKO, которая позволяет рассчитывать как коэффициент отражения от измерительной ячейки, так и распределение электромагнитных полей внутри нее. Рассмотрены два основных типа полосковых линий передачи – симметричная линия с двумя экранами и несимметричная линия с одним экраном. Их модели представлены на рис. 1. Размеры ячеек выбраны следующими: площадь экранов  $50 \times 25 \text{ мм}^2$ , толщина центрального полоскового проводника (полоска) 0.3 мм,



**Рис. 1.** Распределение величины отношения модуля продольной компоненты магнитного поля к векторной сумме поперечных компонент на поверхности образца. *а* – Симметричная линия при размещении образца с одной стороны, *б* – симметричная линия при размещении образцов с двух сторон, *в* – несимметричная линия при размещении образца с одной стороны, *г* – несимметричная линия при размещении образцов с двух сторон.

ширина полоска 5 мм, расстояние от полоска до экрана 2.5 мм, высота короткозамыкающей плоскости в несимметричной линии 16.5 мм. Связь ячейки с измерительным коаксиальным портом, работающим на основной моде, была осуществлена через коаксиально-полосковый переход.

Применена однопортовая методика измерения, в которой исследуемый образец вплотную прижимается к короткозамыкающей плоскости, а его магнитная проницаемость может быть определена по измерению коэффициента отражения. Для учета неоднородностей, присущих любой линии передачи, необходимо применять калибровочные процедуры, которые, в общем случае, основаны на использовании связи между истинным значением коэффициента отражения  $R_{ист}$  измеряемого образца и измеренным значением коэффициента отражения  $R_{изм}$ . Связь между этими величинами описывается формулой Мейсона [10]:

$$R_{изм} = E_{DF} + \frac{E_{RF} R_{ист}}{1 - E_{SF} R_{ист}}. \quad (1)$$

Поправочные коэффициенты  $E_{DF}$ ,  $E_{RF}$  и  $E_{SF}$  определялись по измерению коэффициентов отражения двух эталонных образцов и измерению коэффициента отражения пустой линии, что соответствует методу, описанному в [11]. Эталонные образцы заполняли поперечное сечение линии однородно и без зазоров. Это позволило исключить на этапе калибровки погрешность, связанную с учетом неоднородного заполнения линии. В случае несимметричной линии однородное заполнение было реализовано заполнением эталонным образцом всей площади короткозамыкающей плоскости.

Область линии, заполненной исследуемым образцом, можно характеризовать эффективной магнитной  $\mu_{эф}$  и эффективной диэлектрической  $\epsilon_{эф}$  проницаемостями. Чем более однородно образец заполняет поперечное сечение линии, тем ближе значения  $\mu_{эф}$  и  $\epsilon_{эф}$  приближаются к истинным значениям  $\mu$  и  $\epsilon$  образца. Входной импеданс  $Z_{вх}$  заполненного образцом участка линии для случая нормального падения ТЕМ-волны будет иметь вид:

$$Z_{вх} = \sqrt{\frac{\mu_{эф}}{\epsilon_{эф}}} \operatorname{th} \left( i \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\epsilon_{эф} \mu_{эф}} \right), \quad (2)$$

где  $d$  – ширина образца вдоль волнового вектора электромагнитной волны,  $\lambda$  – длина электромагнитной волны. Чтобы сконцентрировать внимание на анализе процесса измерения магнитной проницаемости, диэлектрическая проницаемость всех образцов была выбрана равной единице. Ширина  $d$  всех образцов равнялась 10 мм, а их длина соответствовала размеру экрана измерительной ячейки и равнялась 50 мм. Все расчеты были проведены на частоте 1 ГГц.

Связь между истинным коэффициентом отражения и материальными параметрами образца, определяющими  $Z_{вх}$ , выражается следующим образом:

$$R_{ист} = \frac{Z_{вх} - 1}{Z_{вх} + 1}. \quad (3)$$

Применяя выражения (1) и (3), необходимо учитывать сдвиг фазы, зависящий от ширины исследуемого и эталонных образцов, относительно плоскости нулевой фазы. Эффективная магнитная

проницаемость из уравнения (3) вычислялась при помощи метода численной оптимизации Ньютона.

Для учета неполного заполнения образцом поперечного сечения линии был применен вариационный метод [12]. В этом методе поперечное сечение линии разделяется на горизонтальные слои, соответствующие материалу образца и воздуху. С использованием квази-ТЕМ приближения, эффективные магнитная  $\mu_{эф}$  и диэлектрическая  $\epsilon_{эф}$  проницаемости, характеризующие неоднородно заполненный образцом участок линии, могут быть выражены следующим образом:

$$\mu_{эф} = \frac{L}{L_0}, \quad \epsilon_{эф} = \frac{C}{C_0}, \quad (4)$$

где  $L$  и  $C$  – эквивалентная индуктивность и емкость заполненной линии, а  $L_0$  и  $C_0$  соответствуют пустой линии без образца.

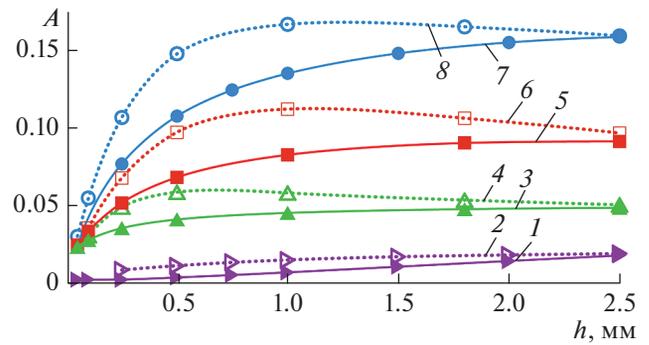
Для определения значений  $L$ ,  $L_0$  и  $C$ ,  $C_0$  используется выражение функции Грина для конкретной конфигурации линии. Эта функция выводится путем решения алгебраических уравнений, полученных с учетом граничных условий на границах и поверхностях раздела. При этом такие вычисления проводятся в приближении бесконечно тонкого полоска. Конечность толщины полоска  $t$  можно учесть при помощи представления его в виде двух удаленных друг от друга на расстояние  $t$  бесконечно тонких плоских проводников.

Истинная магнитная проницаемость определяется применением итерационной процедуры оптимизации. Для произвольного  $\mu$  вычисляется  $\mu_{эф}$  и сравнивается с измеренным значением, затем значение  $\mu$  корректируется и  $\mu_{эф}$  вычисляется снова, пока не будет достигнута сходимость до заданной точности.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Описанная методика измерения предполагает распространение ТЕМ-волны. Наличие продольных компонент электромагнитной волны, распространяющейся вдоль линии в области расположения образца, должно приводить к неточности в определении коэффициента отражения образцов. Для исследования характера распространения полей в линии было проведено численное моделирование симметричной и несимметричной полосковых линий, представленных на рис. 1. Электромагнитное поле в полосковых линиях сконцентрировано вблизи полоска и убывает при удалении от него, поэтому для повышения чувствительности измерения тонких образцов все образцы располагались вплотную к полоску.

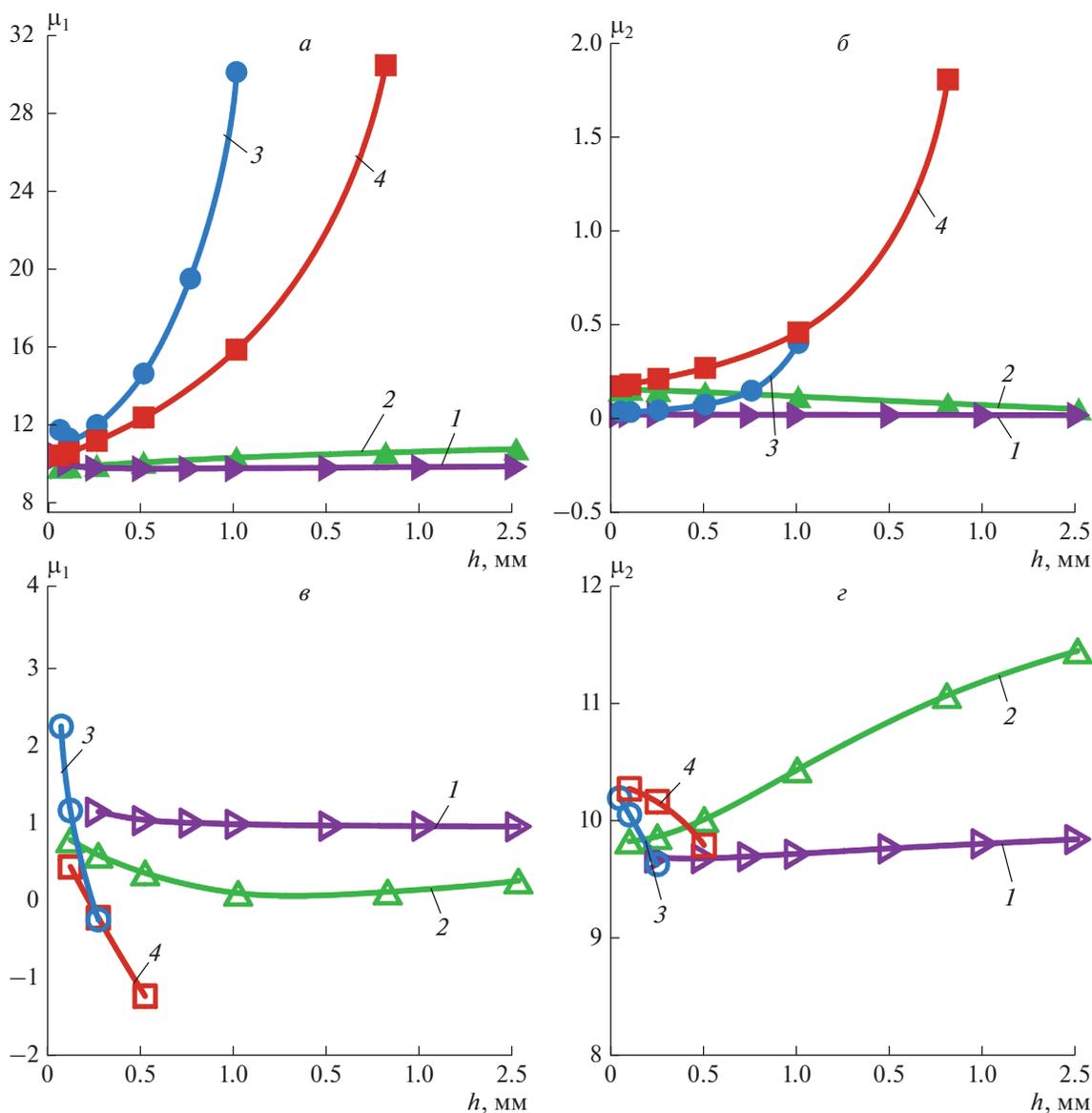
Расчеты при однородном заполнении показали хорошую точность измерения в приближении ТЕМ-волны. Однако при неоднородном заполнении в отдельных случаях наблюдалась существенная погрешность. Одним из основных источников погреш-



**Рис. 2.** Зависимость параметра  $A$  от толщины образца  $h$ . Пунктирные линии с выколотыми точками соответствуют заполнению образцами с магнитной проницаемостью  $\mu = 1 - i10$ , а сплошные линии со сплошными точками – заполнению образцами с  $\mu = 10 - i10$ . 1 и 2 – Симметричная линия при размещении образцов с двух сторон, 3 и 4 – несимметричная линия при размещении образцов с двух сторон, 5 и 6 – несимметричная линия при размещении образца с одной стороны, 7 и 8 – симметричная линия при размещении образца с одной стороны.

ности при измерениях в полосковых линиях считается влияние неоднородных полей от коаксиально-полоскового перехода. Численная оценка области такого влияния показала, что она ограничена 5 мм от края перехода. В нашем случае все образцы были удалены от перехода на 10 мм, что позволяет пренебречь влиянием этого источника погрешности.

Если участок измерительной ячейки, в которую помещен образец, характеризуется сильной неоднородностью заполнения, то при прохождении ТЕМ-волны через такой участок она может существенно исказиться. Было исследовано два случая неоднородного заполнения. В первом случае один исследуемый образец располагался с одной стороны между полоском и экраном. Во втором случае два образца располагались симметрично с двух сторон относительно полоска. Степень искажения ТЕМ-волны внутри полосковых линий при неоднородном заполнении поперечного сечения была оценена в моделировании при помощи расчета на поверхности образца отношения комплексной амплитуды продольной компоненты магнитного поля к векторной сумме комплексных амплитуд поперечных компонент. Результаты расчета для образцов размером  $1 \times 10 \times 50$  мм<sup>3</sup> и магнитной проницаемостью  $\mu = 1 - i10$  представлены на рис. 1, из которого видно, что при размещении образца с одной стороны как симметричной, так и несимметричной полосковой линии, области с большой долей продольных компонент занимают значительную часть объема образца. При симметричном размещении образцов с двух сторон относительно полоска размер областей и величина искажения уменьшается. Также видно, что значительного искажения ТЕМ-волны не наблюдается в области под и над полоском, а основное иска-



**Рис. 3.** Зависимость действительной (*а* и *в*) и мнимой (*б* и *г*) частей магнитной проницаемости образцов, восстановленной вариационным методом, от толщины образцов  $h$  при заданной в моделировании  $\mu = 10 - i0$  (*а* и *б*) и  $\mu = 1 - i0$  (*в* и *г*). 1 – Симметричная линия при размещении образцов с двух сторон, 2 – несимметричная линия при размещении образцов с двух сторон, 3 – симметричная линия при размещении образца с одной стороны, 4 – несимметричная линия при размещении образца с одной стороны.

жение локализовано по краям образца вне полоска, где поле имеет высокую неоднородность. Попытка использования образцов, у которых размеры ограничены краями полоска, не привела к существенному уменьшению искажения поперечной волны. При этом форма таких образцов предполагает высокий фактор размагничивания, который сложно поддается учету и существенно увеличивает погрешность измерения.

Для численной оценки эффективной доли продольной компоненты была вычислена величина, характеризующая степень искажения ТЕМ-волны в объеме образца и равная отношению интеграла

комплексной амплитуды продольной компоненты магнитного поля по объему образца к интегралу векторной суммы комплексных амплитуд поперечных компонент:

$$A = \frac{\int_{V_{\text{обр}}} |H_x| dV}{\int_{V_{\text{обр}}} \sqrt{|H_y|^2 + |H_z|^2} dV}, \quad (5)$$

где  $|H_x|$ ,  $|H_y|$ , и  $|H_z|$  – проекции комплексной амплитуды магнитного поля на оси декартовой системы координат, а  $V_{\text{обр}}$  – объем образца.

Полученный результат для образцов с магнитной проницаемостью  $\mu = 10 - i0$  и  $\mu = 1 - i10$  с разными толщинами представлен на рис. 2. Аналогичные вычисления для электрического поля не приводятся, так как оно не взаимодействует с чисто магнитными образцами. При размещении образцов любой толщины с двух сторон симметричной линии наблюдается наименьшее искажение ТЕМ-волны. Если использовать несимметричную линию с одним экраном, то при размещении образцов с двух сторон будет наблюдаться большее искажение, чем в предыдущем случае. При размещении образцов, с одной стороны, наблюдается несколько иная ситуация – в симметричной линии искажение ТЕМ-волны больше, чем несимметричной. Это объясняется тем, что в симметричной линии распространяется симметричная относительно полоска электромагнитная волна с равными по интенсивности частями с одной и другой стороны. В несимметричной линии из-за отсутствия второго экрана основная часть поля сконцентрирована в единственной области между полоском и экраном, с противоположной стороны от которой поле излучается во внешнюю среду и имеет меньшую интенсивность. Из рис. 2 видно, что общий уровень искажения ТЕМ-волны при размещении образца с одной стороны заметно выше, чем при симметричном размещении образцов с двух сторон. При уменьшении толщины образцов ниже 0.5 мм искажение ТЕМ-волны начинает резко уменьшаться и достигает при толщинах образцов 0.1 мм и менее примерно равного низкого значения. Было также выяснено, что значение параметра  $A$  при фиксированной толщине образца увеличивается с увеличением частоты электромагнитной волны, а также с увеличением как действительной, так и мнимой части магнитной проницаемости образца.

На рис. 3 представлена зависимость магнитной проницаемости образцов  $\mu = \mu_1 - i\mu_2$ , восстановленной вариационным методом при разных способах размещения образца в симметричной и несимметричной полосковых линиях. Погрешность определения магнитной проницаемости для разных случаев соответствует степени искажения ТЕМ-волны (см. рис. 2). При размещении достаточно толстых образцов, с одной стороны, в обоих типах полосковых линий погрешность определения

$\mu_{эф}$  из коэффициента отражения по формуле (3) велика настолько, что восстановить истинную  $\mu$  образца вариационным методом становится невозможным. При уменьшении толщины образцов погрешность уменьшается и при очень тонких образцах лежит в пределах 5–10% для всех рассматриваемых конфигураций измерения. Однако чувствительность измерения уменьшается при снижении доли заполнения линии образцом, что накладывает определенные ограничения на геометрию измерительной ячейки и минимальную толщину исследуемых образцов.

Таким образом, показано, что основным источником погрешности при измерении в полосковых линиях передачи в квази-ТЕМ приближении при неоднородном заполнении является искажение поперечной волны, что в ряде случаев может приводить к существенной погрешности измерения.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-19-00138).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barry W. // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 1986. V. 34. No. 1. P. 80.
2. Gallagher C.P., Cole N., Savage P.P. et al. // IEEE Trans. Microw. Theory. Techn. 2018. V. 67. No. 1. P. 231.
3. Parke L., Hooper I.R., Hicken R.J. et al. // APL Mater. 2013. V. 1. No. 4. Art. No. 42108.
4. Wu Y., Tang Z., Xu Y. et al. // Progr. Electromagn. Res. 2009. V. 11. P. 173.
5. Fessant, A., Gieraltowski J., Loaec J. et al. // J. Magn. Magn. Mater. 1994. V. 133. P. 413.
6. Quéffelec P., Malléol S., LeFloc'h M. // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 2002. V. 50. No. 9. P. 2128.
7. Yousefi L., Attia H., Ramahi O.M. // Progr. Electromagn. Res. 2009. V. 90. P. 1.
8. Quéffelec P., Gelin P., Gieraltowski J. et al. // IEEE Trans. Magn. 1994. V. 30. No. 2. P. 224.
9. Zhao T. Effective medium modeling and experimental characterization of multilayer dielectric with periodic inclusion. PhD dissertation. Iowa State Univ, 2015.
10. Mason S.J. // Proc. IRE. 1953. V. 41. No. 9. P. 1144.
11. Starostenko S.N., Rozanov K.N., Osipov A.V. // J. Appl. Phys. 2008. V. 103. No. 7. Art. No. 07E914.
12. Bhat B., Koul S.K. // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 1982. V. 30. No. 5. P. 679.

### Validity of the single-mode approximation for experimental determination of permeability in strip lines

P. A. Ivanov<sup>a,\*</sup>, S. Y. Bobrovskii<sup>a</sup>, K. N. Rozanov<sup>a</sup>, D. A. Petrov<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Institute of Theoretical and Applied Electromagnetics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia  
\*e-mail: p.ivanov.a@mail.ru

Using electrodynamic modelling, the region of applicability of the transverse electromagnetic wave approximation is investigated for measuring the magnetic permeability in symmetric and asymmetric strip lines. It is shown that in the case of inhomogeneous filling of the line cross section with the samples under study, a longitudinal wave component arises, which leads to a significant measurement error.