

ОДНОВИТКОВЫЕ ИНДУКТИВНОСТИ НА МАГНИТНЫХ ПЛЕНКАХ И МЕТОДИКА ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

К. А. НАРИНЯН

Исследованы одновитковые напыленные индуктивности на тонких магнитных пленках. Приводится методика расчета и измерения индуктивности посредством куметра на высоких частотах. Полученные результаты действительны только для малых сигналов.

В в е д е н и е

В некоторых областях высокочастотной радиотехники, например, в системах частотной модуляции, параметрических системах и т. д., необходимы управляемые реактивные элементы—емкости и индуктивности. В определенных условиях имеет смысл использовать в качестве последних тонкие магнитные пленки [1, 2].

Индуктивность элемента на магнитной пленке зависит от ее геометрических размеров, магнитной проницаемости в направлении остаточной намагниченности, количества напыленных или намотанных витков, от амплитуды и частоты тока. Последнее обстоятельство, очевидно, ограничивает частотный предел технического применения магнитных пленок. Проницаемость магнитных пленок меняется с частотой. Одновременное увеличение потерь может привести к снижению или потере управляемых свойств пленки. Поэтому очень важно знать частотные свойства пленочных индуктивностей на частотах более низких, чем собственная частота ферромагнитного резонанса магнитных пленок (500—600 $M\mu$). Мостовые методы измерений на столь высоких частотах трудно осуществимы по ряду технических причин.

Для измерения индуктивности пленочных компонент мы использовали куметр системы *Tesla* BM-409 с диапазоном 16—300 $M\mu$. На указанных частотах точность измерений ограничивается междувитковой емкостью обмотки. Поэтому исследовались только одновитковые индуктивности. Добавим, что одновитковое исполнение также наиболее приемлемо по технологии. Как будет показано ниже, значения индуктивностей образцов не превышают нескольких наногенри. Поэтому в работе уделено внимание вопросу сведения погрешностей измерения к минимальным значениям.

Индуктивность одновиткового элемента

На рис. 1, а и б приведены два типа индуктивностей:

а) медная полоска напылена непосредственно вокруг тонкой магнитной пленки $Fe\ Ni\ 17/83\%$, с применением изоляции из монооксида кремния между магнитной пленкой и полоской;

б) виток охватывает стеклянную подложку, что облегчает технологию изготовления. Соответствующие размеры приведены на рис. 1а, 1б и в табл. 1.

Пользуясь [3], можно вывести приближенную формулу для индуктивности

$$L = \frac{\mu \mu_0 a^2}{b} + \frac{\mu_0 (p+h)a}{b} = L_M + L_s, \quad (1)$$

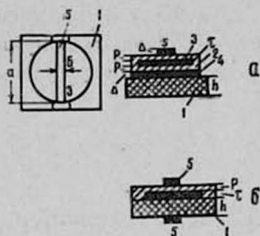


Рис. 1. Напыленная пленочная индуктивность: а) обмотка напылена вокруг магнитной пленки (плотный охват), б) обмотка напылена с охватом подложки (неплотный охват). 1—стеклянная подложка размерами $18 \times 18 \times 0,2$ мм, 2—изоляция из монооксида кремния $P=2$ мк, 3—магнитная пленка, 4—медный подслои $\Delta=1$ мк, 5—шина индуктивности $\Delta=1$ мк.

где $(p+h)$ — толщина изоляции,
 τ — толщина магнитной пленки,
 μ — относительная магнитная проницаемость,
 μ_0 — магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-9}$ н/см,
 b и a — геометрические размеры образца, приведенные на рис. 1.

Формула (1) будет тем более точной, чем больше отношения $\frac{a}{h+p}$ и $\frac{a}{\mu\tau}$. Для данных рис. 1 при $\mu=2000$ эти отношения составляют 20—30.

Таблица 1*

№ образцов	Способ изгот.	$p+h$ мк	b мк	L нГн		L_B нГн		L_M нГн		H_k	τ Å	a см
				Р	И	Р	И	Р	И			
25—1	рис. 1а	3	300	5	5	—	—	4,9	4,8	4,0	2700	0,6
25—3	рис. 1а	3	300	4,2	4,3	—	—	4,1	4,2	4,5	2700	0,6
1736	рис. 1б	210	500	11,5	8	3,3	4,8	8,2	3,2	3,3	2700	0,6
3	рис. 1б	210	500	11,9	8,6	3,0	5,2	8,9	3,4	3,3	3000	0,6

* Р — расчетные данные,
 И — данные измерений.

Магнитные параметры измерялись аппаратурой, описанной [8].

При пользовании формулой (1) μ вычислялась из соотношения $\mu = \frac{4\pi M}{H_k}$,

где $4\pi M = 8000$ гаусс.

Индуктивность состоит из 2 частей: L_s — доля индуктивности от потока через воздух — „воздушная индуктивность“, L_M — доля индуктивности от потока через магнитную пленку — „индуктивность магнитной пленки“.

Если подставить в (1) соответствующие размеры и параметры, то можно убедиться, что L_M одного порядка с L_s , когда виток неплот-

но охватывает пленку (рис. 16), а в случае плотного охвата (рис. 1а) — $L_0 \ll L_M$.

Принимая L_0 не зависящей от частоты при очень тонкой шине (порядка 1–2 мк), определим, как меняется L_M в зависимости от положения вектора намагниченности и далее, при сохранении первого условия, от частоты. В выражении (1) переменной величиной является μ , поэтому естественно рассмотреть изменение μ от указанных факторов [2].

На рис. 2 показано расположение пленочного элемента относительно осей координат, поле смещения H_0 и переменное поле $H \ll H_k^*$. На основе работы [2] легко показать, что статическая и динамическая дифференциальные магнитные проницаемости пленки выразятся уравнениями

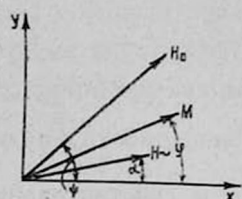


Рис. 2. Векторная диаграмма для условия равновесия вектора намагниченности $\bar{M}$.

$$\mu = \frac{4\pi M}{H_k} \cdot \frac{\sin^2(\varphi - \alpha)}{\cos 2\varphi + h \cos(\psi - \varphi)}, \quad (2)$$

$$\mu(j\omega) = \frac{4\pi M}{H_k} \cdot \frac{\sin^2(\varphi - \alpha)}{1 - \frac{\omega^2}{4\pi\gamma^2 M H_k} + j\frac{\omega}{\gamma H_k} \frac{a_0}{\gamma} + \cos 2\varphi + h \cos(\psi - \varphi)}, \quad (3)$$

где a_0 — коэффициент затухания для магнитных пленок, равный 0,1–0,01, γ — гиромагнитный коэффициент,

$$h = \frac{H_0}{H_k}.$$

Как известно, собственная частота ферромагнитного резонанса магнитных пленок определяется выражением [4]

$$\omega_0 = \gamma [4\pi M H_k]^{\frac{1}{2}}.$$

Исходя из этого, выражение (3) можно видоизменить так:

$$\mu(j\omega) = \frac{4\pi M}{H_k} \frac{\sin^2(\varphi - \alpha)}{\frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j \frac{\omega}{\omega_0} 4\pi a_0 \gamma M + \cos 2\varphi + h \cos(\psi - \varphi)}. \quad (3a)$$

В частном случае, когда постоянное поле $H_0 = 0$ и $\varphi = 0$, возможно определить два вида проницаемости: в одном случае H приложено перпендикулярно оси анизотропии, $\alpha = 90^\circ$, а во втором — параллельно оси анизотропии, $\alpha = 0$. Для последнего случая $\mu_{11} = 1$, а при $\alpha = 90^\circ$

$$\mu_T = \frac{4\pi M}{H_k} = \mu_T(0),$$

$$\mu_T(j\omega) = \frac{\mu_T(0)}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j \frac{\omega}{\omega_0} 4\pi a_0 \gamma M}.$$

* H_k — после анизотропии.

Соответственно статическая и динамическая индуктивности выразятся так:

$$\left. \begin{aligned} L(0) &= L_0 + A\mu_T(0) \\ L(j\omega) &= L_0 + A \frac{\mu(0)}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j \frac{\omega}{\omega_0^2} 4\pi\alpha_0\gamma M} \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Для анализа процессов на высоких частотах введем нормализованную проницаемость трудного направления $\frac{\mu_T(j\omega)}{\mu_T(0)}$ и разложим ее на мнимую и действительную части

$$\frac{\mu_T(j\omega)}{\mu_T(0)} = \frac{\left[1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right] - j \frac{\omega}{\omega_0^2} 4\pi\alpha_0\gamma M}{\left[1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right]^2 + \left[\frac{\omega}{\omega_0^2} 4\pi\alpha_0\gamma M\right]^2} = \frac{\mu'_T}{\mu_T(0)} - j \frac{\mu''_T}{\mu_T(0)},$$

где μ'_T — мнимая часть проницаемости или проницаемость потерь,

μ''_T — действительная часть проницаемости, определяющая индуктивность.

На рис. 3 приведены вычисленные на ЭЦВМ теоретические кривые зависимости

$$\frac{\mu'_T}{\mu_T(0)} = f\left(\frac{\omega}{2\pi}\right) \text{ и } \frac{\mu''_T}{\mu_T(0)} = \varphi\left(\frac{\omega}{2\pi}\right)$$

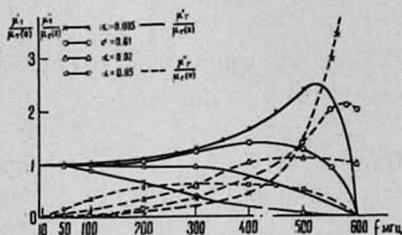


Рис. 3. Теоретические кривые изменения нормализованной проницаемости от частоты.

зующих явление ферромагнитного резонанса, в лучшем случае достигает 350 МГц.

для различных α_0 и для типичного случая, когда $\omega_0 = 600$ МГц. Как видно из кривых, индуктивность (проницаемость) растет или уменьшается в зависимости от изменений α_0 в пределах 0,01 ÷ 0,02. Одновременно с ростом индуктивности увеличиваются потери, поэтому можно утверждать, что рабочий диапазон радиотехнических систем на магнитных пленках, не исполь-

Возможности куметра TESLA

Исходя из того, что измеряемые индуктивности малы, необходимо при измерениях учесть паразитные параметры куметра и установить, какие минимальные изменения индуктивности можно измерить с заданной точностью.

На рис. 4 приведена эквивалентная схема измерительного контура куметра, где

$L_0 = 2,9 \cdot 10^{-9}$ гн — индуктивность внутренней части измерительного контура,

$C_{\text{и}} = C$ — емкость измерительного конденсатора куметра,

$L_s = 2,2 \cdot 10^{-9}$ гн — индуктивность зажимов C_x ,

$L_c = 0,4 \cdot 10^{-9}$ гн — индуктивность измерительного конденсатора,

$R_0 = 3,6 \cdot 10^{-6} \sqrt{f_{\text{ом}}}$ — последовательное сопротивление внутренней части измерительного контура куметра,

$R_{\text{д}}$ — затухание, вносимое детектором.

Влияние двух последних параметров проявляется обычно при измерении больших добротностей, поэтому их можно не учитывать.

Рассмотрим влияние L_0 , L_s и L_c на измерения [5]. Индуктивность L_0 увеличивает кажущуюся индуктивность

$$L' = \frac{1}{\omega^2 C}, \quad (5a)$$

где ω — циклическая частота измерения.

Истинное значение измеренной индуктивности будет меньше на величину L_0 :

$$L = \frac{1}{\omega^2 C} - L_0. \quad (56)$$

Измеряемый элемент обычно присоединяется к измерительным клеммам L_x куметра короткими проводами (2—3 мм), но и в этом случае индуктивность этих проводов соизмерима с индуктивностью измеряемого образца. Поэтому индуктивность выводов образца надо учесть в L_0 . С этой целью и для предотвращения различных ошибок к измерительным клеммам прибора присоединяется специальная колодка с двумя короткими посеребренными металлическими шинами, к которым припаивается измерительный элемент. Закорачивая эти шины, можно измерить значение паразитной индуктивности L_0 .

Индуктивность L_c увеличивает эквивалентную емкость измерительного конденсатора. Прежде чем учесть влияние L_c , заметим, что для увеличения низкочастотных пределов измерения иногда приходится добавлять добавочную емкость к измерительному конденсатору куметра, которая подключается к клеммам C_x прибора. Для указанного случая емкость измерительного контура будет иметь эквивалентную схему (рис. 5),

где $L_{\text{дс}}$ — индуктивность выводов дополнительного конденсатора плюс L_s ,

$C_{\text{д}}$ — емкость дополнительного конденсатора,

$C_{\text{с}}$ — общая емкость измерительного контура.

Составив выражение для проводимости двух реактивных параллельно соединенных сопротивлений [6]

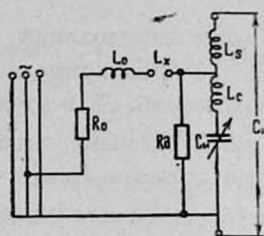


Рис. 4. Эквивалентная схема измерительного контура куметра.

$$-j\omega C_s = \frac{1}{j\left(\omega L_c - \frac{1}{\omega C_H}\right)} + \frac{1}{j\left(\omega L_{ds} - \frac{1}{\omega C_d}\right)},$$

найдем

$$C_s = \frac{C_H}{1 - \omega^2 L_c C_H} + \frac{C_d}{1 - \omega^2 L_{ds} C_d} = C'_s + C''_s. \quad (6)$$

Максимальное значение емкости измерительного конденсатора куметра составляет 110 пф, поэтому, например, на частоте 120 МГц $C''_s = 113$ пф.

Для определения C'_s необходимо знать индуктивность L_{ds} . Значение C_d предварительно уточняется на низкочастотном мосте. Для добавочной емкости не более 90 пф C'_s можно непосредственно определить на том же куметре, используя правое слагаемое (6). По известным значениям C_s и C''_s можно вычислить L_{ds} . Далее строятся кривые зависимости

$$C'_s = \varphi(\omega), \quad C''_s = \varphi(\omega)$$

(здесь не приводятся), которые используются при измерениях. Заметим, что во избежание ошибок необходимо принять меры, чтобы добавочный конденсатор при каждом измерении подключался к клеммам C_x в одинаковом положении.

Для исследования частотной зависимости пленок необходимо определить только индуктивность, вносимую магнитной пленкой L_M . Для этого необходимо произвести два измерения. В одном случае определяется полная индуктивность элемента L , а во втором — воздушная индуктивность L_0 . Величина L_M равна разности

$$L_M = L - L_0. \quad (7)$$

Для определения L_0 достаточно поднести к элементу постоянный магнит. В этом случае вектор намагниченности M пленки будет заторможен в сильном поле и $\mu = 1$. Нетрудно показать, что L_M можно вычислить непосредственно из показаний куметра

$$L_M = \frac{1}{\omega^2} \cdot \frac{C_{s2} - C_{s1}}{C_{s2} \cdot C_{s1}} = \frac{1}{\omega^2} \cdot \frac{\Delta C}{C_{s1} \cdot C_{s2}}, \quad (8)$$

где C_{s1} и C_{s2} — эквивалентные измерительные емкости контура при $\mu \gg 1$ и $\mu = 1$ соответственно, и тогда учитывать L_0 нет необходимости.

Рассмотрим вопрос о погрешностях измерений, а также поставим задачу, какие минимальные относительные изменения индуктивности можно измерить на куметре Tesla с относительной погрешностью, не превышающей допустимую.

Допустимые относительные погрешности шкал емкости и частоты у куметра Tesla составляют 1%. Из выражения (5а) вероятная относительная погрешность в определении L составит

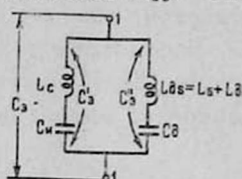


Рис. 5. Эквивалентная схема конденсатора измерительного контура: 1—1 клеммы C_x куметра.

$$\frac{\delta L}{L} = \sqrt{\left(2 \frac{\delta \omega}{\omega}\right)^2 + \left(\frac{\delta C}{C}\right)^2} \approx 2,2\%.$$

Изменение индуктивности элемента при воздействии постоянным магнитом на величину ΔL вызывает изменение резонансной емкости контура на величину ΔC . Для резонансного контура куметра после изменения индуктивности справедливо уравнение

$$L + \Delta L = \frac{1}{\omega^2 (C_{s1} + \Delta C)}. \quad (9)$$

Вычитая выражение (5а) из выражения (9) и считая $C_s = C$, получим

$$\Delta L = \frac{1}{\omega^2} \cdot \frac{\Delta C}{C} \cdot \frac{1}{C - \Delta C} \approx \frac{1}{\omega^2} \frac{\Delta C}{C^2},$$

так как $\Delta C \ll C$ из-за малой величины изменения емкости измерительного контура. Тогда относительная погрешность измерения ΔL будет равна

$$\frac{(\Delta L)}{\Delta L} = \left\{ \left[\frac{\delta(\Delta C)}{\Delta C} \right]^2 + \left[2 \frac{\delta \omega}{\omega} \right]^2 + \left[2 \frac{\delta C}{C} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

Из уравнения (9)

$$\Delta C = \Delta L C^2 \frac{\omega^2}{1 + \frac{\Delta L}{L}} = \frac{\Delta L}{L} \cdot \frac{C}{1 + \frac{\Delta L}{L}}. \quad (11)$$

Далее, умножим и разделим первое слагаемое под радикалом в выражении (10) на $\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2$, подставив в него значение ΔC из уравнения

(11). Решая полученное выражение относительно $\frac{\Delta L}{L}$, получим

$$\left[\frac{\Delta L}{L} \right]_{\min} = \left\{ \frac{\left[\frac{\delta(\Delta C)}{C} \right]^2}{\left[\frac{\delta(\Delta L)}{\Delta L} \right]_{\text{доп}}^2 - \left[2 \frac{\delta \omega}{\omega} \right]^2 - \left[2 \frac{\delta C}{C} \right]^2} \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (12)$$

При подключении добавочного конденсатора C_d емкость измерительного контура C_s растет. Поэтому погрешность при определении ΔC должна уменьшаться. Однако при значительном увеличении C_s кривая $u_c(C_s)$ становится более пологой и увеличивается предельное минимальное значение изменения емкости, которое требуется для заметного перемещения стрелки указателя добротности куметра. Поэтому слишком увеличивать C_s не следует. Погрешность $\frac{\delta \Delta G}{\Delta C}$ была определена экспериментально. Из многократных измерений ΔC при $C_s = 300$ пф было найдено среднее арифметическое ΔC_0 . При добротности измерительного контура $Q > 30$

$$\frac{\delta(\Delta C)}{\Delta C} = \frac{\Delta C_{\max} - \Delta C_0}{\Delta C_0} \approx 10^{-2},$$

где $\Delta C_{\max}$ максимальное отклонение ΔC от среднего значения ΔC_0 . Так как при измерении малых значений индуктивности частота постоянна, то второй член в знаменателе выражения (12) можно отбросить. Неточность установки частоты имеет значение только при измерении абсолютного значения индуктивности. Величина $2 \frac{\Delta C}{C}$ составляет 2%. С учетом изложенного была получена расчетная формула для определения минимального отношения $\left[\frac{\Delta L}{L} \right]_{\min}$ при заданной допустимой погрешности в определении ΔL :

$$\left[\frac{\Delta L}{L} \right]_{\min} \approx \frac{10^{-2}}{\left\{ \left[\frac{\delta(\Delta L)}{\Delta L} \right]_{\text{доп}} - 4 \cdot 10^{-4} \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (13)$$

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В табл. 1 приведены геометрические размеры и магнитные параметры образцов. Во всех случаях оси обмоток совпадают с осью трудного намагничивания пленки. В той же таблице приведены рассчитанные по выражению (1) индуктивности и данные измерений на частоте 40 МГц. Для системы с плотным охватом (рис. 1а) расчетные и экспериментальные данные хорошо согласуются между собой. Видно, что воздушная индуктивность исчезающе мала, как и следовало ожидать. Вторая пара образцов изготовлена намоткой одного витка тонкой медной ленты вокруг стеклянной подложки с пленкой. Воздушная индуктивность здесь соизмерима с индуктивностью пленки, а расхождение между экспериментальными и расчетными данными очевидно объясняется неточностью выражения (1).

Кривые зависимости $\mu'_T = \varphi \left(\frac{\omega}{2\pi} \right)$ для группы образцов приведены на рис. 6. Для сравнения в табл. 2

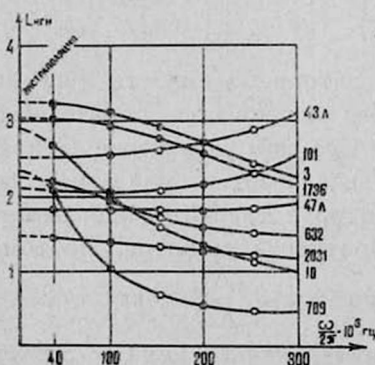


Рис 6. Кривые зависимости индуктивности изделий от частоты.

приводятся некоторые магнитные параметры образцов. Низкочастотный предел измерений составляет 40 МГц. Кривые экстраполированы к нулевой частоте. Если сравнить их с теоретическими (рис. 3), то обнаруживается качественное сходство.

По характеру зависимости μ'_T от частоты пленки можно разделить на четыре основные группы.

Группа А характеризуется затуханием α , меньшим критического. У пленок этой группы μ'_T растет с ростом частоты благодаря резонансу в поле анизотропии H_K . Как видно из табли-

цы, у пленок группы *A* очень незначительная угловая дисперсия анизотропии.

У пленок групп *B* и *Г* проницаемость уменьшается с ростом частоты, при этом у *B* монотонно, у *Г* уменьшение проницаемости происходит довольно резко в области частот до 100 МГц и далее отно-

Таблица 2*

№№	Группа	H_c Э	H_k Э	H_c/H_k	Толщ. А	β_{90}	α см
43Л	А	1,8	4,2	0,43	1670	1,1°	1
101	А	—	—	—	1500	1,3°	1
47Л	Б	3,1	3,7	0,84	1900	1,7°	1
2031	Б	—	—	—	2200	2,5°	0,6
1736	В	2,3	3,3	0,70	2700	6°	0,6
3	В	2,2	3,3	0,67	3000	6,5°	0,6
10	Г	2,7	3,0	0,90	2500	10°	0,6
709	Г	—	—	—	4000	<20°	0,6

* β_{90} — угол дисперсии анизотропии.

H_c — коэрцитивная сила смещения.

сительно медленно. Угловая дисперсия здесь очень велика, особенно у пленок группы *Г*.

Имеется промежуточная группа *Б*, где μ' почти постоянна на всех частотах, то есть пленки этой группы имеют критический параметр затухания.

В заключение прикинем параметры резонансного контура, который можно получить, если напылить емкость параллельно выводам образца № 25-1. Считая $L + 5$ нГн для частоты 100 МГц, получим емкость контура 500 пФ и эквивалентное сопротивление $R_s = 33$ ом, если считать добротность индуктивности равной 10 [7]. На частоте 200 МГц $C = 125$ пФ, $R_s = 66$ ом.

В ы в о д ы

1. Куметр Tesla BM-409 при соответствующем приспособлении можно использовать для измерения некоторых радиочастотных параметров магнитных пленок и индуктивностей, изготовленных из этих пленок.

2. Индуктивность одновиткового элемента на магнитной пленке в напыленном исполнении при диаметре пленки 10 мм и толщине 2000 Å достигает 5 нГн.

3. Резонанс в поле анизотропии H_k возможен только для пленок с дисперсией не более 1,4—2°.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. A. Pohn, A. Read, R. M. Stewart, J. of Applied Physics, Suppl, vol. 31, № 5, 1960.
2. K. Saban, Zeitschrift für Angewandte Physik, 13, 420 (1961).
3. Б. Я. Жуховицкий, И. Б. Нейневицкий, ТОЭ, ч. II, М., „Энергия“, 1965.
4. D. O. Smith, J. of Applied Physics, v. 29, № 3, pp. 264—273, 1958.
5. Г. А. Ремез, Курс основных радиотехнических измерений, М., „Связь“, 1966.
6. К. М. Поливанов, ТОЭ, ч. 1, М., „Энергия“, 1965.
7. К. А. Наринян, Вопросы радиоэлектроники, сер. 7, вып. 3, стр. 102, 1966.

ՄԱԳՆԵՏԱԿԱՆ ԲԱՐԱԿ ԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ ՄԻԱԳԱԼԱՐ
ԻՆԴՈՒԿՏԻՎՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՎ ՆՐԱ ՉԱՓՄԱՆ ՄԵԹՈԴԻԿԱՆ

Կ. Ա. ՆԱՐԻՆՅԱՆ

Տրված է մագնիսական բարակ թաղանթների միադալար ինդուկտիվության վերլուծությունը փոքր ազդանշանների առկայության դեպքում: Տրված է նաև ինդուկտիվության հաշվարկի և չափումների մեթոդիկան Q-մետրի միջոցով: Փորձնական արդյունքները համեմատված են տեսության հետ:

HIGH FREQUENCY ONE TURN THIN MAGNETIC
FILM INDUCTANCES

K. A. NARINIAN

An analysis of the operation of the thin magnetic film inductors in the frequency region up to 300 MHz is given. The inductance and the Q-factor are determined with the help of a Q-meter. Experimental results are compared with the theoretical expectation taken for a small signal.