



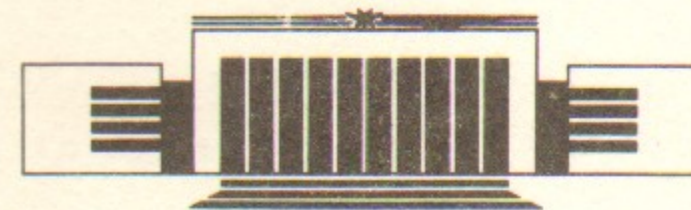
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

32

П.П. Дейчули, В.М. Федоров, А.А. Яценко

ИСКАЖЕНИЕ ФОРМЫ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ,
ПЕРЕДАВАЕМЫХ ПО КОАКСИАЛЬНОМУ КАБЕЛЮ:
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ,
ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ИСКАЖЕНИЙ
И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФОРМЫ

ПРЕПРИНТ 86-56



НОВОСИБИРСК
1986

АННОТАЦИЯ

В работе приводятся результаты экспериментальных измерений затухания ВЧ-сигнала в диапазоне $1-2,5 \cdot 10^3$ МГц и искажений наносекундных импульсов (длительность $1-100$ нс) при передачи их по радиочастотным кабелям длиной $10-100$ м. Предложена электрическая модель кабеля, состоящая из последовательно включенных ячеек, которые представляют собой параллельное соединение ослабителя и интегрирующей RC-цепочки. На основе модели сделаны как простые оценки ожидаемых искажений, так и точные расчеты формы сигнала, а также восстановление первоначальной формы сигнала в контролируемом диапазоне частот для произвольных длин кабеля. Результаты данной работы могут применяться в практике наносекундных электрических измерений и позволяют повысить точность амплитудно-временных измерений до уровня единиц процентов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Измерение разовых импульсных сигналов длительностью $1-100$ нс в практике физического эксперимента имеет ряд трудностей. Вопросы, связанные с устройством датчиков и их калибровкой, применительно к измерению мощных однократных электрических импульсов разбираются в [1] и других работах, цитируемых в [1]. Для передачи сигналов от установки к регистрирующим приборам используются радиочастотные кабели, при этом их длина составляет десятки метров. Наносекундный сигнал, переданный по такой трассе, ослабляется по амплитуде и искажается его форма, причем величина затухания медленно уменьшается с ростом длительности импульса. При «точных» измерениях ($1-5\%$) необходимы количественный учет искажений и возможность восстанавливать исходную форму сигнала.

Затухание сигналов в диапазоне частот $1-2000$ МГц обязано, в основном, омическим потерям в тонком поверхностном слое проводников кабеля (для меди $\delta_{ск} = 0,066/\sqrt{f}$, где $\delta_{ск}$ — в мм, f — в МГц). В режиме «бегущей волны» частотный коэффициент передачи коаксиального кабеля длиной l имеет вид ([2], гл. 1):

$$K(j\omega) = k(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}; \quad k(\omega) = e^{-(b\sqrt{\omega} + (\sqrt{\epsilon}/2c)\text{tg}\delta \cdot \omega)l}, \quad (1)$$

где $k(\omega)$ — амплитудно-частотная характеристика (АЧХ); ω — круговая частота; c — скорость света в вакууме; ϵ , $\text{tg}\delta$ — диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь диэлектрика кабеля.

Коэффициент b имеет следующий вид:

$$b = \frac{0,275 \cdot 10^{-7} \sqrt{\varepsilon} \cdot k_{\text{ж}}}{D (\text{см}) \cdot \ln \frac{D}{d}} \cdot \left(\frac{D}{d} \sqrt{\frac{\mu_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{Cu}}}} + \frac{k_{\text{опл}}}{k_{\text{ж}}} \sqrt{\frac{\mu_{\text{опл}} \cdot \rho_{\text{опл}}}{\rho_{\text{Cu}}}} \right) \left(\frac{\text{сек}^{1/2}}{\text{рад}^{1/2} \cdot \text{м}} \right). \quad (2)$$

Здесь $\rho_{\text{опл}}/\rho_{\text{Cu}}$ и $\rho_{\text{ж}}/\rho_{\text{Cu}}$ — удельное сопротивление проводников, отнесенное к удельному сопротивлению меди при 20°C ; $\mu_{\text{опл}}$ и $\mu_{\text{ж}}$ — их относительная магнитная проницаемость; D — диаметр кабеля по изоляции; d — диаметр центральной жилы, $k_{\text{опл}}$ и $k_{\text{ж}}$ — технологические коэффициенты, учитывающие многопроволочность оплетки и жилы.

Переходная характеристика $h(t)$ «идеального» кабеля, соответствующая ЧХ (1) при $k_{\text{опл}} = k_{\text{ж}} = 1$ и $\text{tg } \delta = 0$, была впервые получена в работе [3]. В терминах операторного метода ($j\omega \equiv p$) оригинал $h(t)$, соответствующий изображению (1) «идеального» кабеля, приводится в справочных таблицах ([4], с.462) и имеет вид:

$$h(t) = 1 - \Phi\left(\frac{bt}{\sqrt{t}}\right), \quad \Phi(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^x e^{-y^2/2} dy. \quad (3)$$

Заметим, что реальный выходной сигнал задержан относительно входного на время распространения сигнала по кабелю. Для простоты записи время задержки исключено нами из этой и последующих формул. Асимптотика $h(t)$ при больших временах ($t \gg b^2 l^2$) имеет простой вид:

$$h(t) \simeq 1 - 0,8 \sqrt{\frac{\tau_{\text{п}}}{t}}; \quad \tau_{\text{п}} = b^2 l^2 \quad (4)$$

Как уже отмечалось, выход $h(t)$ на стационарный уровень происходит медленно. Например, уровень 0,7 функции $h(t)$ достигается при $t_{0,7} = 7\tau_{\text{п}}$, а уровень 0,95 — при $t_{0,95} = 256\tau_{\text{п}}$. Так для кабеля РК75-9-12 длиной 40 м величина $\tau_{\text{п}} = 0,046$ нс (см. таблицу 1) и, соответственно, имеем $t_{0,7} = 0,33$ нс и $t_{0,95} = 12$ нс!

Характеристики радиочастотных кабелей с учетом диэлектрических потерь подробно исследовались в работах [2, 5, 6, 7]. Результаты, полученные в этих работах, не могут быть прямо использованы при численных расчетах задачи восстановления исходной формы сигнала. Во-первых, по причине сложности предлагаемых

Таблица 1

Тип кабеля	РК75-9-12		РК75-4-11		РК75-4-16		РК75-4-21		РК75-4-22	
	Время пробега, нс/м	100/19,6	100/19,6	100/19,6	100/19,6	100/19,6	100/21,1	100/21,1	100/21,1	100/21,1
ε		2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,0	2,0	2,0	2,0
$\text{tg } \delta \pm 20\%, 10^{-4}$	20°C	5	3,5	13	13	13	2,5	2,5	2,5	2,5
$0 \div 2,5 \text{ ГГц}$	-196°C	—	3	3	3	3	2,5	2,5	2,5	2,5
$b \pm 3\%, 10^{-7}$	20°C	2,4	3,9	4,5	4,5	4,5	3,7	3,7	3,7	3,7
$\text{сек}^{1/2}/\text{рад}^{1/2} \cdot \text{м}$	-196°C	—	1,5	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6
Затухание	$f, \text{ ГГц}$	.01	.1	.1	.1	.1	.01	.1	.1	.1
	полное	.015	.057	.34	.31	.54	.024	.084	.31	.31
	омическое	.015	.052	.27	.31	.31	.024	.08	.26	.26
дБ/м, 20°	полное	—	—	.15	.15	.18	.011	.04	.15	.15
	20°C	$\tau_{\text{п}} = b^2 l^2, \text{ нс}$	.09	.23	.31	.31	.24	.24	.24	.24
$T_{\text{к}} = 200 \text{ нс}$	$\tau_{\text{п}} = \frac{\sqrt{\varepsilon}}{2c} \text{ tg } \delta \cdot l, \text{ нс}$	.05	.035	.13	.13	.13	.025	.025	.025	.025
	$\tau_{\text{сх}}, \text{ мкс}$	3,4	.80	.97	.97	.97	1,1	1,1	1,1	.97

моделей. Во-вторых, технологические параметры кабелей которые входят в формулу (1), для современных кабелей могут быть другими. В справочниках по радиочастотным кабелям содержатся лишь ориентировочные данные или величины верхнего предела затухания ВЧ-сигнала (см. например, [8], таблица 3-3). Эти соображения показывают необходимость экспериментального измерения параметров радиочастотных кабелей и построения более удобной для численных расчетов математической модели кабеля.

2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Форму сигнала, прошедшего по кабелю, как известно, можно найти, пользуясь преобразованием типа свертки (см. [2]):

$$U^{\text{вых}}(t) = \int_0^t U^{\text{вх}}(x) g(t-x) dx, \quad (5)$$

где $U^{\text{вых}}(t)$ — сигнал на выходе кабеля; $U^{\text{вх}}(t)$ — сигнал на входе кабеля; $g(t) = dh(t)/dt$ — импульсная характеристика кабеля. Численные значения $h(t)$ и, соответственно, $g(t)$ могут быть получены путем трудоемких вычислений по приближенному выражению для частотного коэффициента передачи (1) (см., например, [2], [5]). Интегрирование (5) по заданным $U^{\text{вх}}(t_k)$ и $g(t_k)$ позволяет вычислить $U^{\text{вых}}(t)$ и оценить величину искажений. Более сложная задача возникает при попытках вычисления исходной формы сигнала $U^{\text{вх}}(t)$ по измеренному ряду $U^{\text{вых}}(t_k)$. Решение в «лоб» интегрального уравнения (5) методом его замены на систему алгебраических уравнений наталкивается на трудности, характерные для решения «некорректных» задач математической физики (см., например, обзор [9]).

В эксперименте сигнал измеряется с конечной точностью и в ограниченной области частот. В нашем случае мы ограничиваемся точностью 1% и верхней граничной частотой $f_{\text{гр}} \approx 1$ ГГц. Ниже будет представлена методика позволяющая находить приближенное решение прямой и обратной задач (5).

Промоделируем распространение сигнала по кабелю прохождением через n последовательно соединенных ячеек, для которых известны аналитические выражения переходных и частотных характеристик $h_i(t)$, $K_i(j\omega)$. Иными словами, представим функцию $K(j\omega)$ в заданном диапазоне частот в виде ряда сомножителей:

$$K(j\omega) \approx K_1(j\omega) \cdot \dots \cdot K_i(j\omega) \cdot \dots \cdot K_n(j\omega). \quad (6)$$

Такое представление возможно, поскольку кабель является линейной системой, что непосредственно проверялось в наших экспериментах (см. следующий раздел). Количество моделирующих ячеек зависит от выбранного типа функций $K(j\omega)$ и необходимой точности приближения. Форму импульса на выходе модельной схемы получим, применяя n раз преобразование типа (5), когда выходной сигнал i -ой ячейки считается входным для $i+1$ -ой.

Для решения задачи восстановления исходной формы сигнала нужно пропустить сигнал, зарегистрированный на выходе кабеля, через ячейки с обратным частотным коэффициентом передачи:

$$\tilde{K}(j\omega) = K_1^{-1}(j\omega) \cdot \dots \cdot K_i^{-1}(j\omega) \cdot \dots \cdot K_m^{-1}(j\omega); \quad m < n, \quad (7)$$

причем часть ячеек из (6), для которых $k_i(\omega \rightarrow \infty) \rightarrow 0$, моделирующих сильное затухание в СВЧ области, не используется при восстановлении исходной формы сигнала. В дальнейшем такое неполное восстановление формы сигнала (кроме сверхвысоких частот) будем называть ВЧ-коррекцией.

В качестве элементарной ячейки для моделирования коаксиального кабеля была выбрана схема (рис. 4), представляющая собой параллельное соединение ослабителя с коэффициентом передачи A_i , и интегрирующей RC-цепочки с постоянной времени τ_i и коэффициентом передачи на постоянном токе $(1-A_i)$. Коэффициент передачи такой ячейки (τ - A -ячейка) равен:

$$K_i(j\omega) = A_i + (1-A_i)/(1+j\omega\tau_i). \quad (8)$$

Выбранная схема имеет то преимущество, что обратный коэффициент передачи $K^{-1}(j\omega)$ для ячеек ВЧ-коррекции ($A_i \neq 0$) имеет вид совершенно аналогичный прямому:

$$K_i^{-1}(j\omega) = \tilde{A}_i + (1-\tilde{A}_i)/(1+j\omega\tilde{\tau}_i), \quad (9)$$

$$\text{где } \tilde{A}_i = 1/A_i; \quad \tilde{\tau}_i = A_i\tau_i. \quad (10)$$

Импульсные характеристики, соответствующие коэффициентам передачи (8) и (9), известны и имеют вид:

$$g_i(t) = A_i \cdot \delta(t) + (1-A_i)e^{-t/\tau_i}; \quad \tilde{g}_i = \tilde{A}_i \cdot \delta(t) + (1-\tilde{A}_i)e^{-t/\tilde{\tau}_i}, \quad (11)$$

где $\delta(t)$ — дельта-функция.

Восстановленную форму сигнала на входе i -ой ячейки можно найти с помощью преобразования, аналогичного свертке (5), которое будет иметь следующий вид:

$$U_i^{\text{вх}}(t) = \int_0^t U_i^{\text{вых}}(x) \tilde{g}_i(t-x) dx, \quad (12)$$

Причем в качестве исходной информации $U_i^{\text{вых}}(t)|_{t=0}$ используется сигнал, измеренный на выходе кабеля. Восстановленную форму сигнала $\tilde{U}^{\text{вх}}(t) \simeq U^{\text{вх}}(t)$ получим, применяя последовательно m -раз преобразование (12) в соответствии с числом ячеек ВЧ-коррекции.

В заключение раздела сделаем несколько замечаний. Вообще говоря, выбор схемы, моделирующей линейное радиочастотное устройство, не определен однозначно, см. [10] гл. 13. В наших экспериментах (см. следующий раздел) измерялся только модуль коэффициента передачи $k(\omega) = |K(j\omega)|$, поэтому и сравнивались только АЧХ кабеля и АЧХ модели, которые, кроме того, совпадают приближенно и в конечном интервале частот. Как известно, равенство модулей коэффициентов передачи является необходимым, но недостаточным условием эквивалентности схем [10]. Для проверки эквивалентности модельной схемы и выбранного типа кабеля дополнительно проводилось сравнение рассчитанной на ЭВМ и экспериментально измеренной форм импульса, прошедшего через кабель, при этом совпадение в пределах 1–1,5% считалось достаточным.

3. ИЗМЕРЕНИЕ АЧХ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАБЕЛЕЙ

Общие замечания. Для применения в расчетах формул (1) необходимо знать величины входящих в нее параметров b и $\text{tg}\delta$, а также их зависимость от частоты. В справочных данных по диэлектрическим потерям есть значительные расхождения. Например, для полиэтилена $\text{tg}\delta = 2,3 \cdot 10^{-4}$ на частоте 9,2 ГГц в работе [11] и $\text{tg}\delta = 10^{-3} \cdot \sqrt{f} / (1 + 0,12 \cdot f)$ (где f — в ГГц) для кабельного полиэтилена по эмпирической формуле, предложенной в [5]. Что касается величины b , то она, согласно формуле (2), зависит от коэффициентов $k_{\text{опл}}$ и $k_{\text{ж}}$, которые на частотах 1–100 МГц зависят от геометрии укладки и диаметра проводников, а на более высоких частотах также от плотности и однородности их укладки [7]. Ниже

перечислим дополнительные аспекты вопроса измерений.

1. При составлении модели кабеля возникает вопрос: зависит ли $k(\omega)$ от уровня сигнала? В справочной литературе этот вопрос не обсуждается. Зависимость от уровня сигнала, в принципе, может возникнуть из-за контактных переходов между проволочками оплетки и в центральном проводнике, если он многожильный. Может оказаться, что для малого сигнала ($\ll 1$ В) затухание больше, чем для большого (≥ 1 В). Измерения показали, что в диапазоне 0,01–100 В (0,01–0,1 В — уровень сигнала анализатора Х1-19; 1–10 В — мощный ВЧ-генератор; 1–100 В — амплитуда импульсного сигнала) для образцов кабеля РК75-4-16 влияния уровня сигнала на $k(\omega)$ нет (в пределах точности измерений $\simeq 1\%$).

2. Измерение АЧХ проводилось для кабелей, свернутых в бухту, тогда как в эксперименте используются обычно прямые связующие кабели, заключенные в экран. На высоких частотах это может сказаться на величине $k(\omega)$. Чтобы исключить такую ошибку, было проведено сравнение результатов измерений $k(\omega)$, выполненных в различных условиях. Отличие $k(\omega)$ прямого кабеля от свернутого в бухту диаметром ≥ 30 см не превышает 1%; при диаметре < 20 см отличия становятся заметны. Например, при среднем диаметре изгиба 10–15 см для кабеля РК75-4-16, эти отличия на частоте 1 ГГц составляет 15–20%.

3. Есть опасение, что данные, полученные для одного образца, отличаются от полученных для другого образца кабеля того же типа. Измерения со многими образцами кабеля из различных партий показали, что технологический разброс амплитудно-частотных характеристик кабеля не превышает точности измерений.

4. На измерения $k(\omega)$ могут повлиять отражения сигнала от неоднородностей в кабеле и от мест подключения кабеля к генератору, нагрузке или другому кабелю. Согласно техническим условиям [8] величина волнового сопротивления кабеля Z_k может откло-

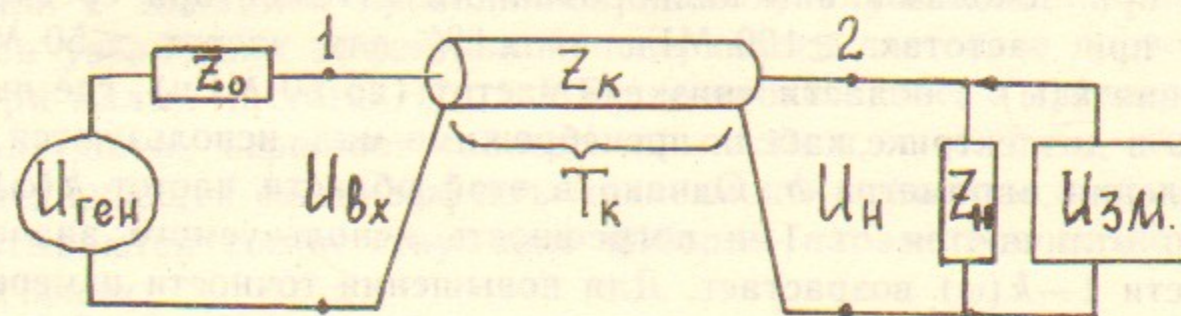


Рис. 1. Схема измерений.

няться от номинала на $\pm 4\%$. При импульсных измерениях, схема которых изображена на рис. 1, когда кабель согласован на обоих концах, в режиме бегущей волны (при $T_n < 3 \cdot T_k$, где T_n — длительность импульса; T_k — время пробега волны по кабелю) удвоенный коэффициент передачи от генератора к нагрузке (точка 2) равен:

$$k = 2U_n/U_r \approx 1 - 0,25 \left(\frac{\Delta Z_k}{Z_0} \right)^2; \quad \text{где } \Delta Z_k = Z_k - Z_0, \quad (13)$$

т. е. в первом приближении не зависит от отклонения волнового сопротивления кабеля от номинала. При $\Delta Z_k/Z_k = 4\%$ величина $\Delta k/k$ пренебрежимо мала — $0,04\%$. Аналогичная ситуация будет при измерении коэффициента передачи по схеме «с кабелем — без кабеля». По этой схеме сделана большая часть измерений, представленных далее (сигнал, измеренный в точке 2 без кабеля ($T_k = 0$) считается входным, а измеренный в той же точке при наличии кабеля ($T_k \neq 0$) — выходным). При измерении $k(\omega)$ с помощью синусоидального сигнала ситуация ухудшается. В этом случае имеем

$$k \approx 1 - 0,5 \left(\frac{\Delta Z_k}{Z_0} \right) - 4 \left(\frac{\Delta Z_k}{Z_0} \right)^2 \cdot e^{2j\omega T_k}. \quad (14)$$

При $\Delta Z_k/Z_0 = 4\%$ величина $\Delta k/k = 2\%$, поэтому для измерений с точностью 1% необходимо согласовывать кабель с точностью не хуже 2% .

Методика измерений. Измерение частотных характеристик кабеля проводилось в диапазоне частот до $2,5$ ГГц несколькими взаимодополняющими методами. В диапазоне $0,5$ — 1000 МГц использовался измеритель АЧХ Х1-19 А со встроенным генератором качающейся частоты. Точность относительных измерений затухания (для уменьшения влияния неравномерности собственной АЧХ прибора) при использовании калиброванного аттенюатора составила $\approx 3\%$ при частотах ≥ 100 МГц и $\approx 1\%$ для частот ≤ 50 МГц. Значения $k(\omega)$ в области «низких» частот (до 50 МГц), где вклад потерь в диэлектрике кабеля пренебрежимо мал, используются для вычисления параметра b . Однако в этой области частот $k(\omega)$ не сильно отличаются от 1 и погрешность используемого значения разности $1 - k(\omega)$ возрастает. Для повышения точности измерений при частотах до 50 МГц использовался кабель большой длины (150 — 200 м), когда затухание велико, а затем пересчитывалось значение $k(\omega)$ для интересующих нас длин (10 — 40 м), с исполь-

зованием его экспоненциальной зависимости от длины кабеля. В этой же области частот проводились прямые измерения затухания с помощью мощного ВЧ-генератора и осциллографа. При этом одновременно измерялся уровень сигнала (высокоомным пробником) в начале и в конце линии, а также по ее длине для выявления возможных неоднородностей и несогласованностей. В диапазоне частот $1,8$ — $2,5$ ГГц измерения проводились на фиксированных частотах. Уровень сигнала отсчитывался с помощью амплитудно-калиброванной детектирующей головки цифровым вольтметром.

Результаты измерений. Результаты измерений $k(\omega)$ для нескольких типов кабелей с электрической длиной 200 нс показаны на рис. 2. Для других длин (кроме сильно отличающихся от исходной) с хорошей точностью справедлив пересчет по формуле

$$k(\omega, l) = [k(\omega, l_0)]^{l/l_0}. \quad (15)$$

Обработка результатов измерений показала, что частотная характеристика в диапазоне 1 — 2500 МГц хорошо описывается зависимостью типа (1):

$$k(\omega) \approx e^{(\sqrt{\omega\tau_n} + \omega\tau_d)}, \quad (16)$$

где

$$\tau_n = b^2 l^2 = \text{const}; \quad \tau_d = T_0 \frac{\text{tg}\delta \cdot l}{2} \approx \text{const}; \quad T_0 = \frac{\sqrt{\epsilon}}{c}. \quad (16')$$

Коэффициент пересчета обычной длины в электрическую, обозначенный T_0 , измерялся прибором И2-7 и равен: для кабелей с полиэтиленовым диэлектриком $T_0 = 5,10$ нс/м; для кабелей с тефлоновым диэлектриком $T_0 = 4,75$ нс/м.

Величины коэффициентов b и $\text{tg}\delta$ приведены в таблице 1. В области частот 10 — 2500 МГц $b = \text{const}$. При уменьшении частоты от 10 МГц до 1 МГц, когда величина скин-слоя становится сравнимой с толщиной проводников кабеля, b уменьшается на 10% из-за увеличения эффективной поверхности плетеного проводника, а при малых частотах ($f < 1$ МГц) сопротивление, а следовательно и затухание, перестает зависеть от частоты, т. е. $b\sqrt{\omega} = \text{const}$. В моделирующей схеме эффекты зависимости величины b от частоты учитываются соответствующим выбором параметров низкочастотных ячеек.

Для контроля правильности полученных результатов можно использовать измерения параметров кабелей при температуре жидкого азота (-196°C). Эти измерения интересны и сами по себе в

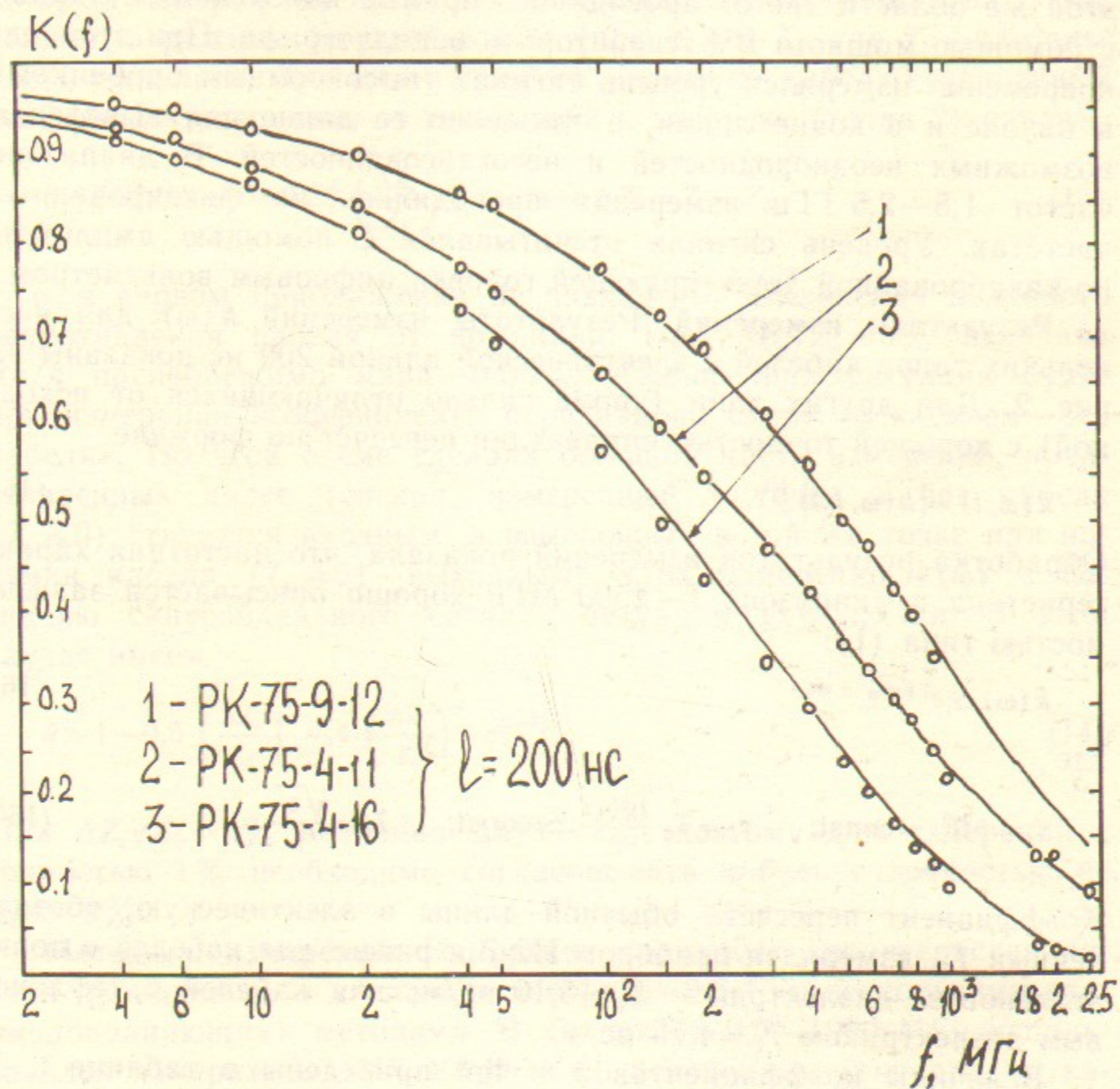


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики коаксиальных кабелей. \circ — экспериментальные данные, сплошные кривые — расчет по формуле (16) с параметрами из таблицы 1.

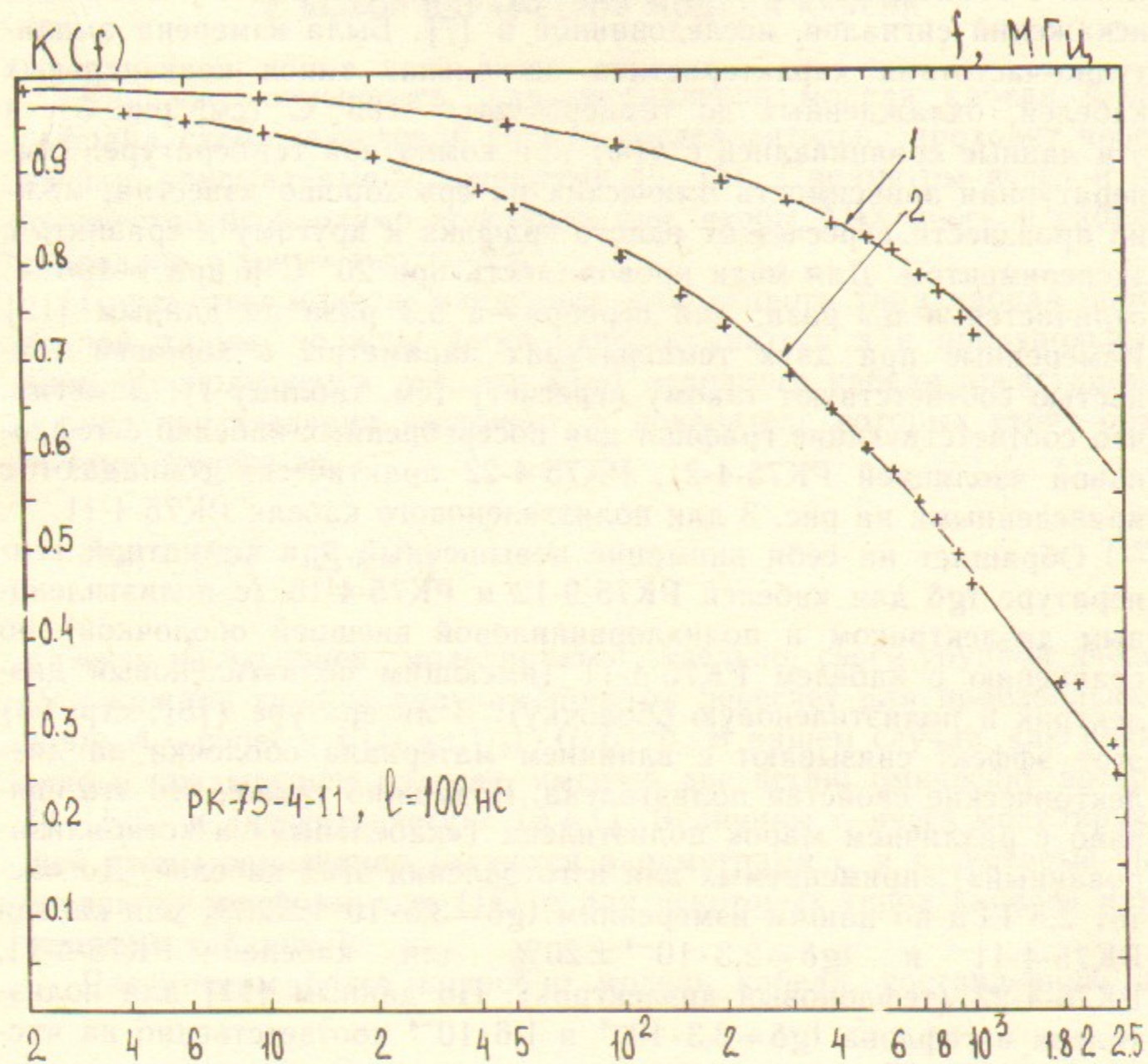


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики кабеля. 1 — при температуре -196° , 2 — при температуре 20° , + — экспериментальные данные, сплошные кривые — аппроксимация по формуле (16).

связи с возможностью использования охлаждения для уменьшения искажений сигналов, исследованной в [7]. Была измерена амплитудно-частотная характеристика нескольких типов коаксиальных кабелей, охлажденных до температуры -196°C (см. рис. 3), и эти данные сравнивались с $k(\omega)$ при комнатной температуре. Температурная зависимость омических потерь хорошо известна, можно произвести пересчет от одного графика к другому и сравнить с экспериментом. Для меди проводимость при 20°C и при -196°C отличается в 6,9 раза; для серебра—в 5,3 раза по данным [12]. Измеренные при двух температурах параметры с хорошей точностью соответствуют такому пересчету (см. таблицу 1). Заметим, что соответствующие графики для посеребренных кабелей с тефлоновой изоляцией РК75-4-21, РК75-4-22 практически совпадают с приведенными на рис. 3 для полиэтиленового кабеля РК75-4-11.

Обращает на себя внимание повышенный при комнатной температуре $\text{tg}\delta$ для кабелей РК75-9-12 и РК75-4-16 (с полиэтиленовым диэлектриком и полихлорвиниловой внешней оболочкой) по сравнению с кабелем РК75-4-11 (имеющим полиэтиленовый диэлектрик и полиэтиленовую оболочку). В литературе ([8], стр. 98) этот эффект связывают с влиянием материала оболочки на диэлектрические свойства полиэтилена. Возможно также, что это связано с различием марок полиэтилена («кабельный» и «стабилизированный»), применяемых для изготовления этих кабелей. До частот 2,5 ГГц по нашим измерениям $\text{tg}\delta = 3,5 \cdot 10^{-4} \pm 20\%$ для кабеля РК75-4-11 и $\text{tg}\delta = 2,3 \cdot 10^{-4} \pm 20\%$ для кабелей РК75-4-21, РК75-4-22 (тефлоновый диэлектрик). По данным [11] для полиэтилена и тефлона $\text{tg}\delta = 2,3 \cdot 10^{-4}$ и $1,6 \cdot 10^{-4}$ соответственно на частоте 9,2 ГГц. Эти результаты находятся в удовлетворительном соответствии, если учесть, что первые относятся к материалам кабелей, а вторые—к чистым образцам. Интерполяционная формула для $\text{tg}\delta$ из [5] в области частот 1—3 ГГц дает значения, близкие к нашим измерениям, только для РК75-4-16. Для кабелей РК75-9-12 и РК75-4-11 интерполяционная формула дает завышенные в 2—3,5 раза значения $\text{tg}\delta$.

Сравнение величины логарифмического декремента затухания по нашим и литературным данным для синусоидального сигнала в диапазоне частот 0,1—3 ГГц (см. таблицу 1 и в [8] таблицы 3-3 и 3-6, а также ТУ на радиочастотные кабели) показывает, что если для РК75-9-12 и РК75-4-16 отличия невелики ($\approx 10\%$), то для РК75-4-11, РК75-4-21 и РК75-4-22 литературные данные завышены на 30—50%.

4. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ КАБЕЛЯ

Как уже отмечалось, для составления модели кабеля была выбрана схема, в которой сигнал последовательно проходит через ячейки, описываемые уравнениями (8, 11). Параметры ячеек и их количество необходимо подобрать так, чтобы АЧХ ячеек и кабеля совпадали с точностью 1—2%.

Параметры модели, найденные для данного типа кабеля определенной длины, должны легко пересчитываться для произвольных длин. Воспользуемся тем, что $k(\omega)$ исходного кабеля представимо в виде произведения экспонент, в показателе которых стоят различные степени ω :

$$k(\omega) = \exp\left(-l \sum_1^m a_k \omega^{\beta_k}\right). \quad (17)$$

Каждая из экспонент моделируется отдельно, своей группой ячеек. Для каждой группы получим простой пересчет для произвольных длин: $A_i = \text{const}$ и $\tau_i(l) = \tau_i(l_0) \cdot (l/l_0)^{1/\beta_i}$. В нашем случае, как показано в предыдущем разделе, имеется две ветви: омические потери ($\beta = 1/2$) и диэлектрические ($\beta = 1$). Величины τ_i ячеек моделирующей схемы однозначно задаются параметрами τ_n и τ_d , которые вычисляются по формулам (16) и для некоторых типов кабелей приведены в таблице 1.

Рассмотрим более подробно модель кабеля, составленную из

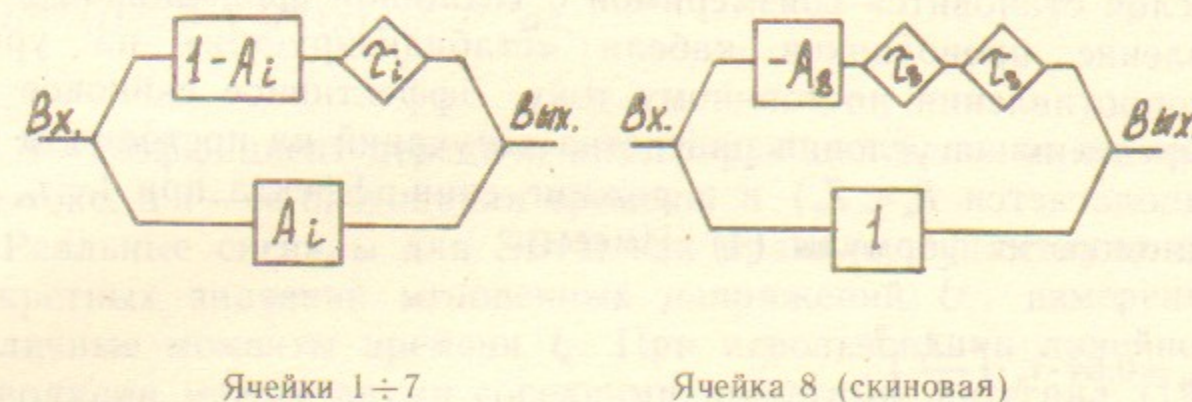


Рис. 4. Схема моделирующих ячеек. \diamond —интегрирующие RC-цепочки ($i=1\div 8$), \square —идеальный ослабитель, пропускающий на выход долю сигнала, равную A_i .

последовательно включенных τ -А ячеек. Структурная схема ячеек приведена на рис. 4, а параметры ячеек даны в таблице 2. Ячейки $N=1 \div 3$ моделируют затухание в СВЧ области ($A_{1 \div 3} = 0$, $\tau_{1 \div 3} < 1$ нс), причем $N=1$ и 2 — омические потери, а $N=3$ — диэлектрические. При восстановлении исходной формы сигнала эти ячейки не учитываются. Остальные ячейки определяют затухание в области средних и высоких частот. Вклад диэлектрических потерь определяет ячейка с $N=4$ и максимальным затуханием, равным 7%. Особенность режима скиновых потерь, отмеченная во введении, проявляется в очень медленном выходе на «стационар» (см. формулу (4)). Этот переходной режим моделируется ячейками с $N=5 \div 7$ с полным коэффициентом ослабления $A_5 \cdot A_6 \cdot A_7 = 0,54$.

Таблица 2

Параметры ячеек

№ ячейки	1	2	3	4	5	6	7	8
A_i	0	0	0	0,93	0,667	0,871	0,93	$R_k/2Z_k$
τ_i	$0,15\tau_n$	τ_n	$2,7\tau_d$	$24\tau_d$	$7,5\tau_n$	$40\tau_n$	$400\tau_n$	$0,4\tau_{ск}$
$\bar{A}_i = 1/A_i$	—	—	—	1,08	1,5	1,15	1,08	—
$\bar{\tau}_i = A_i \cdot \tau_i$	—	—	—	$22\tau_d$	$5\tau_n$	$35\tau_n$	$372\tau_n$	—

В области больших времен эффекты зависимости $b(\omega)$, о которых шла речь в предыдущем разделе, учтены уменьшением примерно на 20% величины τ_7 . При еще больших временах толщина скин-слоя становится соизмеримой с толщиной проводников и сопротивление проводников кабеля «стабилизируется» на уровне R_k — сопротивления постоянному току. Эффективное скиновое время определим из условия равенства затуханий на постоянном токе (предполагается $R_k \ll Z_k$) и в режиме скин-эффекта при $t = \tau_{ск}$, определяемого из формулы (4). Имеем

$$\tau_{ск} = 0,64 \cdot \tau_n \cdot \left(\frac{2Z_k}{R_k} \right)^2 \quad (18)$$

Определенное таким образом время $\tau_{ск}$ не зависит от длины кабеля ($\tau_n \propto l^2$, $R_k \propto l$) и по порядку величины совпадает с обычным скиновым временем. Величина $\tau_{ск}$ для исследованных типов кабелей приведена в таблице 1. Переход от постоянного тока к частотам, когда скин-эффект начинает играть существенную роль, моде-

лирует ячейка 8. Эта ячейка содержит последовательно включенные две интегрирующие RC-цепочки с одинаковыми $\tau_8 = 0,4 \cdot \tau_{ск}$, которые затягивают момент включения скин-эффекта на время $\Delta t \approx 0,3 \cdot \tau_{ск}$. Ослабитель $A_8 = R_k/2Z_k$, соответствует затуханию в кабеле для постоянного тока. При работе с импульсами, длительность которых не превышает ≈ 100 нс, эта ячейка может не учитываться как при решении прямой, задачи, так и при решении обратной задачи.

ВЧ-коррекция проводится по 4-м ячейкам, параметры которых указаны в таблице 2. Результат коррекции удобно проследить по изменению АЧХ кабеля при включении ВЧ-коррекции (см. рис. 5). Из рисунка 5 видно, что ВЧ-коррекция позволяет значительно расширить полосу пропускания кабеля. Например, для РК75-4-11 длиной 200 нс граничная частота по уровню 0,7 равна 70 и 600 мГц, соответственно, до и после ВЧ-коррекции.

5. РАСЧЕТ ИСКАЖЕНИЙ И ИХ СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ, ВЧ-КОРРЕКЦИЯ.

Алгоритм расчета. Из формул (5, 11, 12) видно, что решение как прямой, так и обратной задачи описывается одним и тем же выражением (разница лишь в параметрах) и сводится к вычислению интеграла, соответствующего прохождению сигнала через интегрирующую RC-цепочку:

$$U^{в\text{ых}}(t) = \frac{B}{\tau} \int_0^t U^{в\text{х}}(x) e^{-(t-x)/\tau} dx, \quad (19)$$

где B — коэффициент передачи интегрирующей цепочки на постоянном токе, а τ — ее постоянная времени.

Реальные сигналы для ЭВМ, как правило, существуют в виде дискретных значений мгновенных напряжений U_k , измеренных в различные моменты времени t_k . При использовании линейной интерполяции между двумя соседними отсчетами, интеграл (19) вычисляется аналитически и в результате получается рекуррентная формула:

$$U_{n+1}^{в\text{ых}} = B \cdot U_n^{в\text{х}} + (U_n^{в\text{ых}} - BU_n^{в\text{х}}) e^{-x} - B(U_{n+1}^{в\text{х}} - U_n^{в\text{х}}) \cdot \frac{1 - e^{-x}}{x}; \quad x = \frac{t_{n+1} - t_n}{\tau}. \quad (20)$$

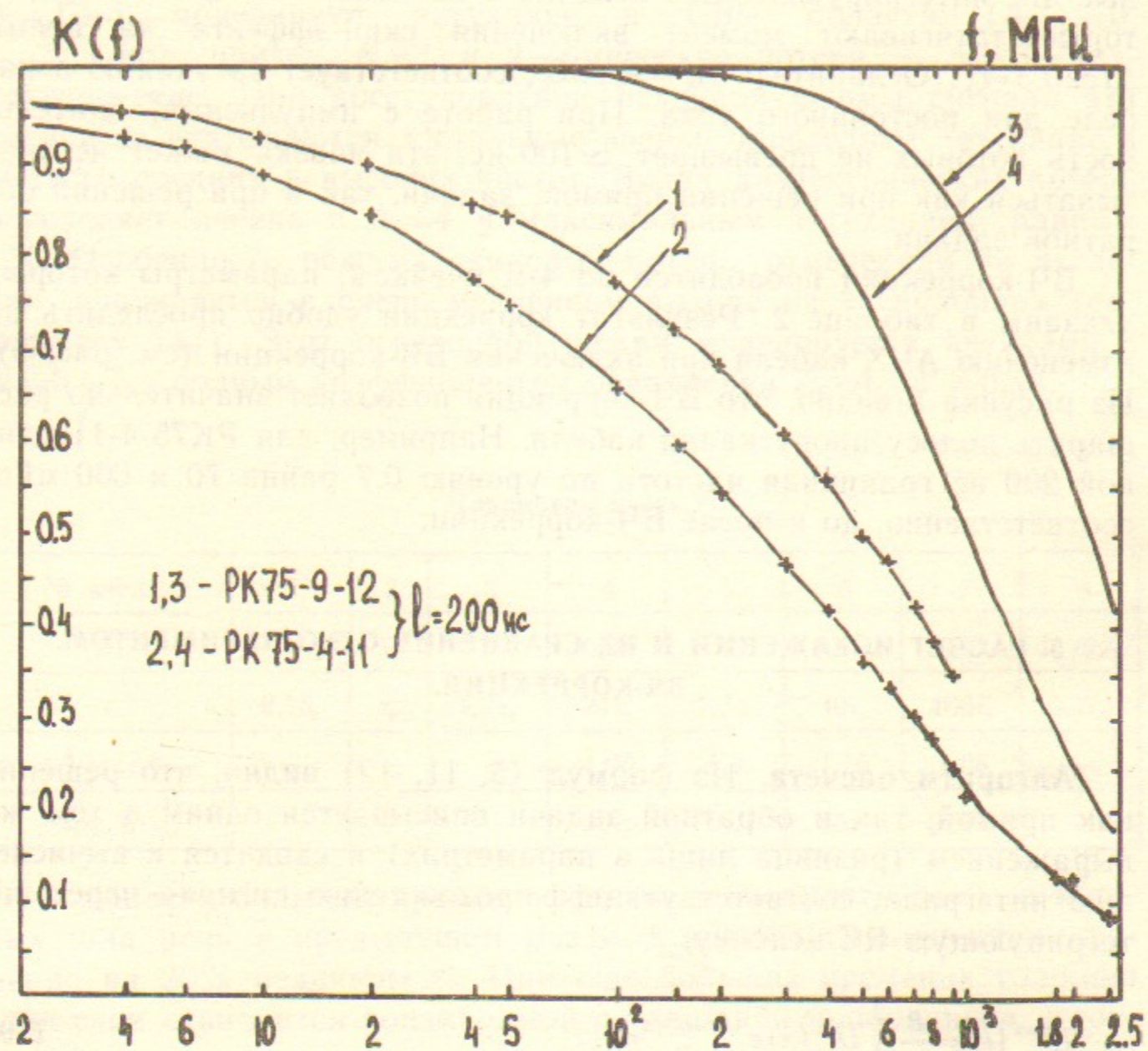


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики моделей кабелей до (кривые 1, 2) и после ВЧ-коррекции (кривые 3, 4), + — экспериментальные точки.

Для численного вычисления интеграла (19) количество операций пропорционально N^2 , где N — число точек разбиения; а при использовании формул (20) число операций пропорционально N . Таким образом, время счета для рекуррентной формулы (20) примерно в N раз меньше, чем при интегрировании выражения (19) «в лоб».

Поскольку решение прямой и обратной задач описывается одними и теми же уравнениями, то для решения обеих задач может быть использована одна и та же подпрограмма.

Число точек разбиения. Минимально необходимое число точек, задающих сигнал, можно определить как отношение длительности импульса $T_{и}$ к требуемому временному разрешению ΔT : $N_{\min} = T_{и} / \Delta T$. Дополнительное ограничение на N_{\min} возникает также из условия обеспечения заданной точности воспроизведения формы сигнала при принятом способе интерполяции. Например, для линейной интерполяции, как в нашем случае (см. (20)), при воспроизведении синусоидального сигнала с точностью 1% необходимо иметь 23 разбиения на период, а точность в 5% обеспечивается при 10 разбиениях. Часто бывает, что сигнал представлен относительно медленной компонентой и быстрой, амплитуда которой относительно мала ($\approx 20\%$). В этом случае требования на точность восстановления быстрой компоненты ослабляются, соответственно, обратно пропорционально ее относительной амплитуде.

Рабочая программа. Для обработки регистрируемых сигналов создана программа, позволяющая как рассчитывать форму импульса на выходе кабельной линии, так и производить ВЧ-коррекцию его формы. Для работы использовалась микро-ЭВМ «Электроника-60М». Расчет формы импульса, заданного 100 точками, при использовании моделирующей схемы, состоящей из 8 ячеек, занимает 30—40 с и время счета линейно зависит от числа точек.

Для тестирования программы использовалось аналитическое выражения для переходной характеристики моделирующей схемы, содержащей 6 τ -А ячеек. Задав входной импульс в виде ступеньки с бесконечно крутым фронтом, мы получили на выходе импульс, с высокой точностью совпадающий с переходной характеристикой. Другим тестом является пропускание известного импульса по моделирующей схеме «туда (искажение) и обратно (восстановление)». При этом отличие формы вычисленного импульса от исходного не превышает 0,5%. (В качестве таких сигналов нами использовалась ступенька с бесконечно крутым фронтом и 1—3 периода синусоидальных колебаний, заданных по 100 точкам.)

Примеры расчета искажений формы импульсов, имеющих вид

узкого пика, длительностью 3 нс и ступеньки с фронтом ≈ 1 нс, приведены на рис. 6 и 7. Там же иллюстрируется ВЧ-коррекция этих импульсов.

Экспериментальная проверка. В предыдущем разделе отмечалось, что необходима экспериментальная проверка эквивалентности модели и реального кабеля. Такая проверка проводилась сравнением расчетных форм импульсов и измеренных в эксперименте. Импульсы для экспериментальной проверки выбирались такими, чтобы воздействие модели (или ее части) на импульс было достаточно заметным. Использовались импульсы с формой ступеньки (длительность фронта ≈ 1 нс) и колоколообразный импульс длительностью 3 нс на полувысоте. Форма импульсов регистрировалась контактной фотосъемкой с экрана осциллографа С7-15 (полоса 5 ГГц, толщина луча 40 мкм). Точность измерений формы сигнала не хуже 1%. Расчетная форма импульсов совпадает с экспериментально измеренной с точностью 1–2% (см. рис. 6, 7). При ВЧ-коррекции восстановление ведется не по всему спектру импульса, поэтому различие между восстановленной формой импульса и исходной для коротких импульсов несколько больше. Точность восстановления не хуже 3% обеспечивается для импульсов с длительностью ≈ 3 нс.

Замечания по характеру искажений, вносимых кабелем. Анализ искажений колоколообразных импульсов показывает, что уширение импульса происходит медленнее, чем «проседание» по амплитуде. При не слишком большом затухании, когда $U^{\text{вых}}/U^{\text{вх}} \approx 0,5$ относительное уширение вдвое меньше относительного затухания:

$$\frac{\Delta\tau_{0,7}}{\tau_{0,7}} \approx \frac{\Delta\tau_{0,5}}{\tau_{0,5}} \approx 0,5 \left| \frac{\Delta U}{U^{\text{вх}}} \right|, \quad (21)$$

где: $\tau_{0,7}$ и $\tau_{0,5}$ — ширины импульса по уровням 0,7 и 0,5 соответственно. Величина затухания колоколообразного импульса примерно соответствует затуханию синусоидального сигнала с периодом $T_{\text{экв}} \approx 2,7\tau_{0,5} \approx 4\tau_{0,7}$ и примерно равна

$$\frac{\Delta U}{U^{\text{вх}}} \approx 1 - e^{-\sqrt{\omega_{\text{экв}} \tau_{\text{п}}}} \approx 1,2 \sqrt{\tau_{\text{п}}/\tau_{0,7}} \approx 1,5 \sqrt{\tau_{\text{п}}/\tau_{0,5}}. \quad (22)$$

Расчеты позволяют также оценить дополнительное (связанное с дисперсией) временное запаздывание импульса $\Delta T_{\text{к}}$ по отношению к времени пробега $T_{\text{к}} = \frac{\sqrt{\epsilon}}{c} \cdot l$. Для кабеля РК75-4-11 с

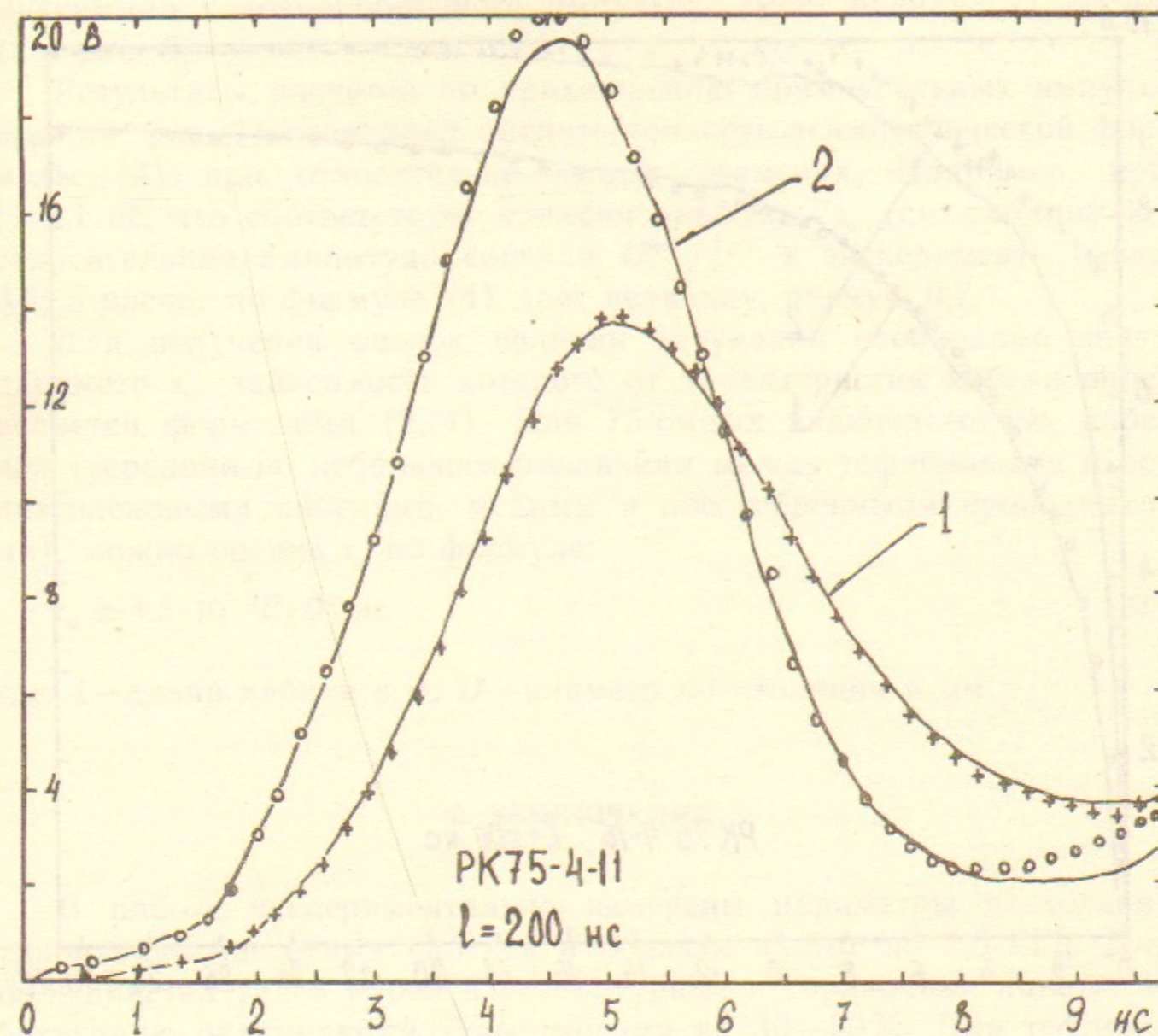


Рис. 6. Расчет искажений и восстановление формы для колоколообразного импульса. \circ , $+$ — импульс на входе и выходе, экспериментальные точки; 1 — численный расчет импульса на выходе; 2 — импульс, восстановленный ВЧ-коррекцией.

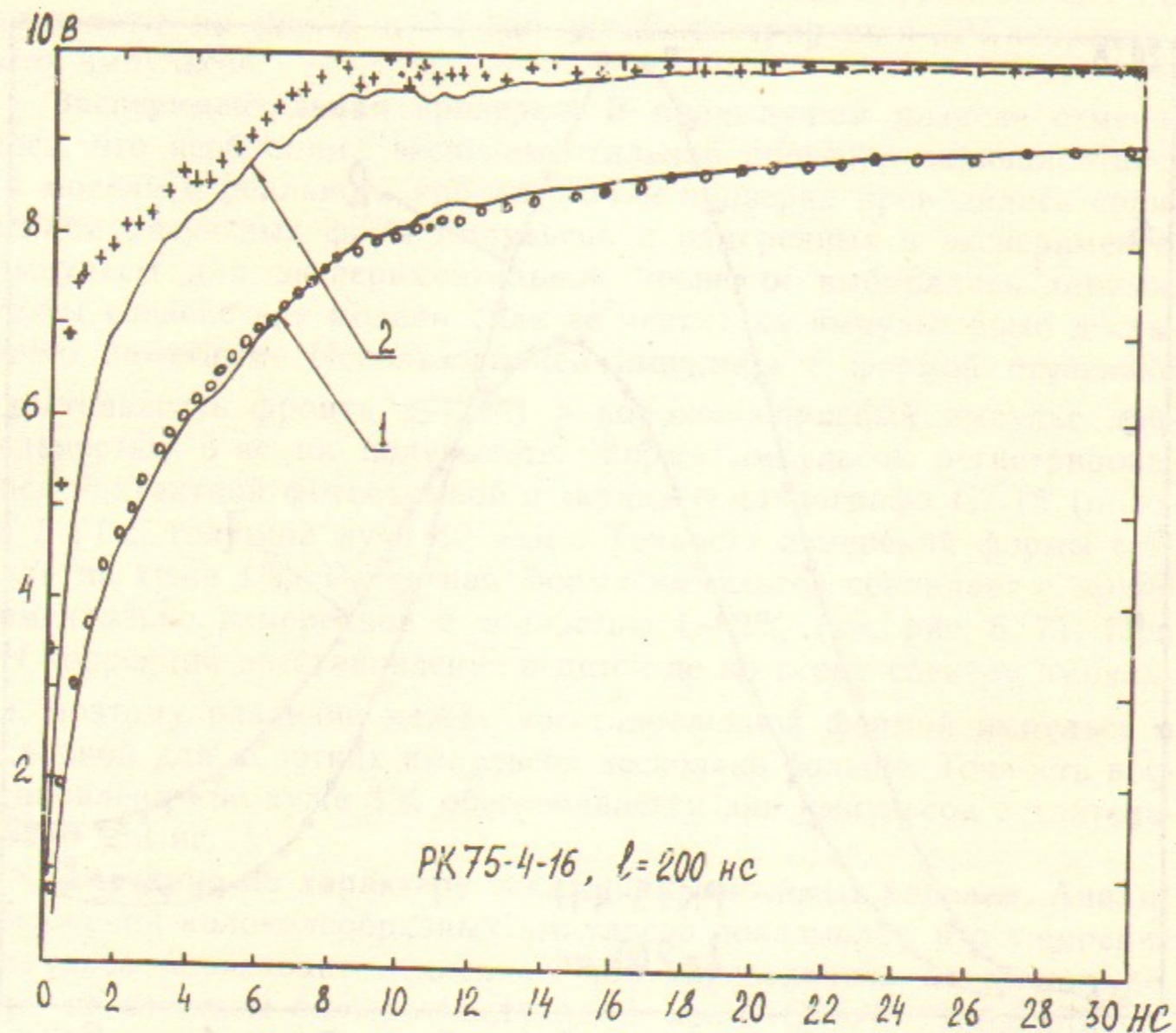


Рис. 7. Расчет искажений и восстановление формы для импульса в виде «ступеньки». +, o — импульс на входе и выходе, экспериментальные точки; 1 — численный расчет выходного импульса; 2 — импульс, восстановленный ВЧ-коррекцией.

$T_k = 200$ нс (≈ 40 м) величина ΔT_k , определенная по смещению максимума колоколообразного импульса, имеет оценку: $\Delta T_k < 1$ нс (см. рис. 6).

Результаты расчетов по прохождению прямоугольных импульсов (см. рис. 7) позволяют оценить точность асимптотической формулы (4) при относительно малых временах. Например, при $t = 2,1$ нс, что соответствует времени равному $7\tau_n$ (см. таблицу 1), относительная амплитуда сигнала $U^{вх}/U^{вх}$ в эксперименте равна 0,6, а расчет по формуле (4) дает величину, равную 0,7.

Для получения оценок величин затухания необходимо знать параметр τ_n , зависимость которого от характеристик кабеля определяется формулами (2, 4). Для 75-омных радиочастотных кабелей (усредняя по небольшим различиям между тефлоновыми и полиэтиленовыми кабелями, медным и посеребренными проводниками), можно оценить τ_n по формуле:

$$\tau_n \approx 4,5 \cdot 10^{-3} l^2 / D^2 \text{ нс}, \quad (23)$$

где: l — длина кабеля в м, D — диаметр по изоляции в мм.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе экспериментально измерены параметры нескольких типов радиочастотных кабелей в области частот до 2,5 ГГц. Для большинства типов кабелей литературные и справочные данные по затуханию оказываются завышенными на 30—50%. Для тефлоновых и «жестких» полиэтиленовых кабелей (изоляция из стабилизированного полиэтилена и полиэтиленовая оболочка) с диаметром изоляции $D < 20$ мм на частотах до 1—2 ГГц затухание определяется, в основном, потерями в проводниках. «Гибкие» полиэтиленовые кабели с близкими размерами с диэлектриком из «кабельного» полиэтилена и полихлорвиниловой внешней оболочкой имеют потери в 1,2—1,5 раза выше. Диэлектрические потери заметно проявляются на частотах ≈ 1 ГГц, их относительный вклад в потери быстро растет с частотой.

Оценку величины затухания для «усредненного» радиочастотного кабеля длиной l м и диаметром по изоляции D мм можно делать по формуле $\Delta U / U^{вх} \approx 0,06l / D\sqrt{T_n}$ — на «хвосте» прямоугольного импульса длительностью T_n нс и $\Delta U / U^{вх} \approx 0,09l / D\sqrt{\tau_{0,5}}$ — для колоколообразного импульса длительностью по полувывсоте $\tau_{0,5}$ нс.

Если величины искажений оказываются больше приемлемой, то пользуясь методикой, изложенной в работе, можно рассчитать форму искаженного импульса, а также провести «восстановление» исходной формы сигнала.

Предложенный в работе метод решения обратной задачи при восстановлении исходной формы сигнала, прошедшего по кабелю, может оказаться полезным при решении других линейных интегральных уравнений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дейчули П.П., Федоров В.М. Измерение больших импульсных напряжений и токов наносекундной длительности. ВАНТ, серия Термоядерный синтез, 1984, вып.3, 22.
2. Моругин Л.А., Глебович Г.В. Наносекундная импульсная техника. М.: Советское радио, 1964.
3. Жекулин Л.А. Неустановившиеся процессы в коаксиальном кабеле. Известия АН СССР ОТН, 1946, №9, 1243.
4. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. М.: Наука, 1965.
5. Глебович Г.В. Переходные характеристики коаксиальных кабелей с учетом потерь в диэлектрике. Электросвязь, 1961., №5, 73.
6. Глебович Г.В. Искажения наносекундных импульсов при прохождении по коаксиальному кабелю. Радиотехника, 1963., т.18, №10, 54.
7. Глебович Г.В. Переходные характеристики коаксиальных кабелей при температуре жидкого азота. ПТЭ, 1966., №3, 132.
8. Белоруссов Н.И., Гроднев И.И. Радиочастотные кабели. М.: Энергия, 1973.
9. Турчин В.Ф., Козлов В.П., Малкевич М.С. Использование методов математической статистики для решения некорректных задач. УФН, 1970., №102, 345.
10. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 1983.
11. Зальцман Е.Б. Измерение $\text{tg}\delta$ диэлектриков методом передачи через резонатор. ПТЭ, 1965., №6, 101.
12. Кей Дж., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных. М.: Физматгиз, 1962., 97.

П.П. Дейчули, В.М. Федоров, А.А. Яценко

**Искажение формы наносекундных импульсов,
передаваемых по коаксиальному кабелю:
Экспериментальные измерения, численный расчет искажений
и восстановление формы**

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Работа поступила 29 января 1986 г.
Подписано в печать 28.03. 1986 г. МН 11689.
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 2,0 печ.л., 1,6 уч.-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 56.

Набрано в автоматизированной системе на базе фото-
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и
отпечатано на ротапринтере Института ядерной физики
СО АН СССР,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.