

М-42
20/III-66
ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

13 - 3645



С.В.Медведь, Ю.Н.Симонов

ИСКАЖЕНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ
В КОАКСИАЛЬНЫХ КАБЕЛЯХ

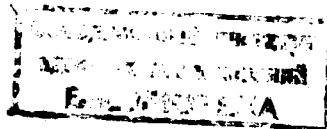
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1967.

13 - 3645

С.В.Медведь, Ю.Н.Симонов

ИСКАЖЕНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ
В КОАКСИАЛЬНЫХ КАБЕЛЯХ



7184/2
49

1.

В физике высоких энергий к настоящему времени достигнут значительный прогресс в освоении наносекундного диапазона длительностей электрических импульсов. Известны модульные счётные системы, обладающие разрешающими временами порядка нескольких наносекунд при скорости счёта до $100 \text{ Мгц}^{/1-3/}$. В этих системах неизбежно присутствие большого количества соединительных элементов для передачи информации от одного модуля к другому.

Для передачи сигналов обычно используются коаксиальные кабели. В связи с этим изучение реакции кабелей на воздействие сигналов наносекундной длительности представляет большой практический интерес.

Расчёт искажений импульсов при их прохождении по коаксиальному кабелю принципиально не труден, но требует много времени на вычисления. Желательно поэтому иметь данные об искажениях сигналов в коаксиальных кабелях разных типов в виде набора кривых, позволяющих с минимальными затратами времени и без обращения к другим источникам произвести выбор кабеля для конкретного применения. Подобные кривые позволят также количественно оценить ряд эффектов, вызванных применением кабелей для передачи сигналов и ведущих в ряде случаев к систематическим аппаратурным ошибкам при точных временных измерениях.

Нами предпринята попытка создать пособие такого рода для нужд физика-экспериментатора.

Искажения сигналов при передаче их по коаксиальному кабелю обусловлены конечным значением сопротивления проводников, внутреннего и внешнего, и потерями в диэлектрике^{/4/}. С повышением частоты сопротивление проводников растет (скин-эффект). Это приводит к увеличению затухания высокочастотных составляющих спектра импульса, то-есть к искажению его фронта. На высоких частотах резко возрастают потери и в диэлектрике кабеля, что ведет к дополнительным искажениям фронта. В случае импульсов наносекундной длительности, частотный спектр которых простирается до нескольких Гц, необходимо учитывать оба вида потерь.

Зная частотную характеристику кабеля $K(j\omega)$, можно с помощью обратного преобразования Фурье рассчитать переходную характеристику $h(t)$, то-есть реакцию кабеля на сигнал ступенчатой формы. Последняя связана с частотной характеристикой следующими формулами^{/5/}

$$h(t) = K(0) + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{N(\omega)}{\omega} \cos \omega t d\omega \quad (1)$$

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{M(\omega)}{\omega} \sin \omega t d\omega \quad (1a)$$

где $K(0)$ — значение модуля функции $K(j\omega)$ при нулевой частоте, $M(\omega) = K(\omega) \cos \phi(\omega)$ и $N(\omega) = K(\omega) \sin \phi(\omega)$ — вещественная и мнимая части $K(j\omega)$, соответственно, $\phi(\omega)$ фазово-частотная характеристика. По переходной характеристике кабеля можно, в свою очередь, рассчитать реакцию кабеля на любое произвольное воздействие, воспользовавшись одним из видов суперпозиционного интеграла Дюамеля^{/6/}, например,

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = U_{\text{ВХ}}(0) h(t) + \int_0^t \frac{d}{dt} U_{\text{ВХ}}(r) h(t-r) dr = \quad (2)$$

$$U_{\text{ВХ}}(t) h(0) + \int_0^t U_{\text{ВХ}}(r) \frac{d}{dt} h(t-r) dr \quad (2a)$$

Большей частью экспериментатор получает все данные о сигнале $U_{\text{вх}}(t)$ с экрана осциллоскопа, и, естественно, не ищет аналитического выражения для его формы. Поэтому выражение (2а) более пригодно для практических вычислений, так как не содержит под знаком интеграла производных по времени от входного сигнала. Однако в (2а) остается производная по времени от переходной характеристики. Операцию дифференцирования функции $h(t)$ можно устранить, если вместо переходной характеристики воспользоваться импульсной характеристикой $v(t)$, то-есть реакцией кабеля на воздействие, описываемое δ -функцией. Очевидно, что импульсная и переходная характеристики связаны, так как они отражают одни и те же физические свойства системы. Формально δ -функцию можно рассматривать как производную от единичного ступенчатого сигнала ^{/8/}. Тогда импульсная характеристика есть производная по времени от переходной характеристики системы

$$v(t) = h'(t) \quad t \geq 0.$$

Для реальных кабелей с потерями $h(0) = 0$ и выражение (2а) обращается в следующее: $U_{\text{вых}}(t) = \int_0^t U_{\text{вх}}(r) v(t-r) dr$. Во всех расчётах, результаты которых приведены ниже, был применен метод импульсных характеристик, как наиболее удобный для вычислений на ЭЦМ. Переходные характеристики кабелей рассчитывались как частный случай искажения сигналов прямоугольной формы длительностью 100 нсек и более.

Импульсные и переходные характеристики некоторых типов коаксиальных кабелей отечественного производства были исследованы в работах ^{/4,7-11/}. Было показано, что потери в диэлектрике существенно влияют на искажения импульсов в наносекундной области длительностей сигналов, приводя к уменьшению крутизны начального участка переходной характеристики. Этот эффект тем значительнее, чем меньше длина кабеля, то-есть чем шире его полоса пропускания. При использовании длинных отрезков кабеля (50 и более метров) учёт потерь в диэлектрике не столь существенен. Для задержки импульсов целесообразно использовать кабели с большим диаметром внутреннего проводника, так как такие кабели имеют меньшие омические потери.

В настоящей работе приведены данные, полученные расчётным путем, о форме переходной характеристики и времени ее установления. Показано также, как искажаются сигналы прямоугольной формы длительностью 3 и 10 нсек. Расчёты выполнены для 7 марок кабеля и нескольких значений длин отрезков, которые перекрывают диапазон от 5 до 200 метров.

Понятие о времени установления переходной характеристики кабеля $t_{уст}$ нуждается в некотором пояснении. Как видно из рисунка 1, переходная характеристика имеет два участка - участок быстрого роста и участок медленного нарастания до установившегося значения. Поэтому время установления переходного процесса, определяемое обычным способом (от уровня 0,1 до уровня 0,9 от установившегося значения), не отражает величины искажений фронта передаваемого через кабель сигнала.

Следуя ^{/7/}, введем другое определение интересующей нас величины. Воспользуемся известным соотношением

$$t_{\phi 2} = \sqrt{t_{\phi 1}^2 + t_{уст}^2}$$

где $t_{\phi 1}$ - длительность фронта импульса на входе кабеля,
 $t_{\phi 2}$ - длительность фронта импульса на выходе кабеля,
 $t_{уст}$ - искомое время установления переходного процесса в кабеле.
 Измерив величины $t_{\phi 1}$ и $t_{\phi 2}$ (на уровнях 0,1 и 0,9), можно найти время $t_{уст}$. Оказывается, что при таком определении величина $t_{уст}$ практически совпадает с интервалом времени, заключенным между точками пересечения касательной к переходной характеристике (на уровне 0,5) с осью абсцисс и прямой линией, соответствующей установившемуся значению переходной характеристики (рис. 1). Величины $t_{уст}$, рассчитанные таким образом, приведены в таблице 1.

На рис. 3-9 показаны формы переходных характеристик, на рисунках 10-16 - искажения прямоугольных сигналов длительностью 10 нсек, на рисунках 17-23 - искажения сигналов той же формы, но длительностью 3 нсек.

Данные для кабеля РК-75-7-11 не приводятся, так как они практически совпадают с результатами расчёта для кабеля РК-75-7-15.

Математическая процедура и процесс расчёта, включая программу, написанную в командах ЭЦВМ М-20, детально описаны ранее ^{/15/}. Необходимые для расчёта сведения о затухании сигналов разных частот в кабелях взяты из спра-

/12,13/. Следует заметить, что в ряде случаев эти данные плохо согласуются между собой.

Разделение суммарных потерь на потери в проводниках и диэлектрике производилось на частоте 3 Гц в соответствии с процедурой, предложенной Брианти^{/14/}.

Для проверки правильности расчётов были сняты переходные характеристики для отрезков кабелей различной длины. Исследовались кабели типов РК-75-4-11 (РК-101), РК-75-4-12 (РК-149), РК-50-2-11 (РК-119) и РК-100-7-11 (РК-102). Измерения проводились с помощью стробоскопического осциллографа с собственным временем нарастания около 0,3 нсек. Входной импульс с фронтом около 0,8 нсек подавался от генератора на ртутном реле.

Экспериментальная и расчётная переходные характеристики совпадают во всех случаях вполне удовлетворительно, с учётом того, что входной сигнал при выполнении эксперимента имел конечное время установления фронта. Наложение расчётной и экспериментальной переходных характеристик для отрезка кабеля РК-75-4-11 длиной 50 метров приведено на рисунке 2.

Представляет интерес дополнительное запаздывание вершины и центра тяжести импульса за счёт искажений. Немного нам известно, количественные данные о дополнительном запаздывании импульсов в кабелях, зависящем от формы сигналов, в литературе отсутствуют. Это явление, заметное в наносекундном диапазоне длительностей сигналов, заставляет осторожно относиться к временной калибровке аппаратуры с помощью импульса от генератора, если форма, а, следовательно, и спектральный состав калибровочного импульса отличны от формы рабочего импульса.

Другим важным обстоятельством, которое нельзя не учитывать, является наличие медленного спада ("хвоста") на выходе длинных отрезков кабеля. Это может сильно повлиять на работоспособность аппаратуры при высокой частоте следования сигналов.

В заключение авторам приятно поблагодарить А.А.Баскину, принимавшую участие в работе на предварительной стадии, проф.Г.В.Глебовича, А.Ф.Дунайцева, В.Г.Зинова и Е.Б.Озерова за обсуждение ряда вопросов и полезные советы.

Л и т е р а т у р а

1. R.M.Sugarman, W.A.Higinbotham, A.H.Yonda. Nuclear Electronics, Proc. of the Conf. in Belgrade, 15-20 May, 1961, Vienna (1962).
2. A.Barna, J.H.Marshall, D.F.Torzewski, Rev.Sci.Instr, 36, 166 (1965).
3. Ю.Б.Бушнин, А.Ф.Дунайцев, В.А.Сенько. Препринт ИФВЭ СЭФ 67-36-К, Серпухов (1967).
4. Г.В.Глебович. Электросвязь, 15, № 5 73 (1961).
5. Л.А.Меерович и Л.Г.Зеличенко. Импульсная техника "Сов.радио", М.1953.
6. М.И.Конторович. Операционное исчисление и процессы в электрических цепях, "Наука" М., 1964.
7. Л.А.Моругин, Г.В.Глебович. Наносекундная импульсная техника, "Сов.радио", М, 1964.
8. Г.В.Глебович. Радиотехника, 18, № 10 54 (1963).
9. В.М.Горбачёв, Н.А.Уваров, Л.Д.Усенко, ПТЭ, № 2 92 (1962).
10. Г.В.Глебович, Изв.ВУЗов "Радиотехника", 8, №1 42 (1964).
11. Г.В.Глебович. Труды ГПИ, 20, вып. 2 (1964).
12. Д.С. Бачелис, Н.И.Белоруссов, А.Е.Саакян. Электрические кабели, провода и шнуры (Справочник), ГЭИ М-Л (1963).
13. В.И.Кацалепенко. Провода и кабели в СЦБ и связи, "Транспорт", М., 1966.
14. G.Brianti, Preprint CERN 65-10, Geneva (1965).
15. С.В.Медведь, Ю.Н.Симонов. Препринт ОИЯИ 3327, Дубна (1967).

Рукопись поступила в издательский отдел

27 декабря 1967 года.

Таблица I.

ВРЕМЯ УСТАНОВЛЕНИЯ ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Марка кабеля Длина отрезка, метры	PK-100-7-II PK - 102 (I2, I3)	PK-100-7-I3 PK - 2 (I2)	PK-75-4-I2 PK - I49 (I2)	PK-75-4-II PK - 101 (I2)
5	0,05	0,06	0,26	0,13
10	0,17	0,24	1,1	0,37
15	0,30	0,57	2,2	0,80
20	0,55	0,95	3,9	1,3
35	1,6	3,1	11	3,3
50	2,8	6,0	23	6,6
75	6,5	14	51	14
100	11	23	93	24
150	25	56	200	54
200	44	98	370	100
Марка кабеля Длина отрезка, метры	PK-75-7-I2 PK - I20 (I2)	PK-75-7-I5 - (I2)	PK-75-7-I8 - (I2)	PK-50-2-II PK - II9 (I2, I3)
5	0,12	0,13	0,38	0,28
10	0,36	0,33	1,5	1,1
15	0,77	0,66	3,5	2,4
20	1,2	0,98	6,0	4,3
35	3,4	2,6	19	13
50	7,1	4,7	38	26
75	16	10	86	59
100	27	17	150	100
150	60	37	340	240
200	106	64	610	420

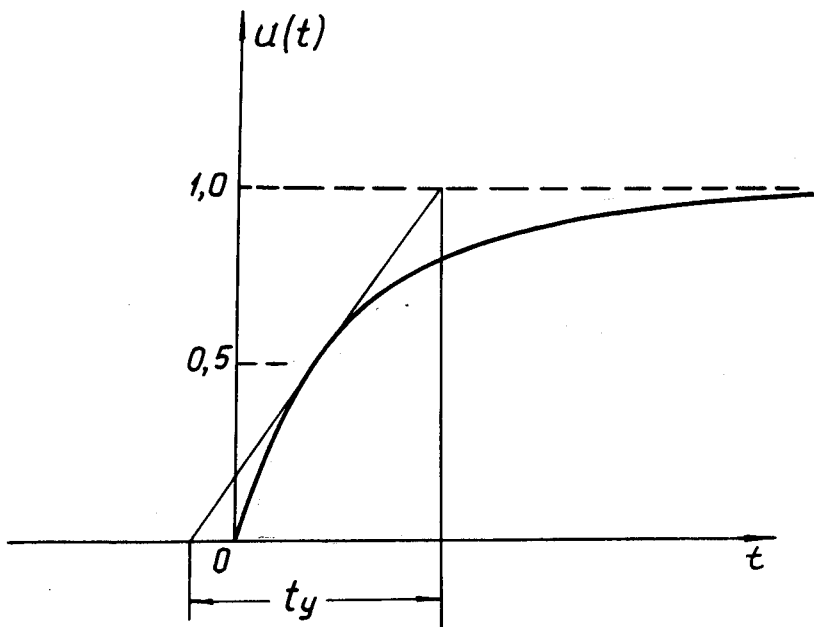


Рис. 1. Методика определения времени установления переходной характеристики кабеля.

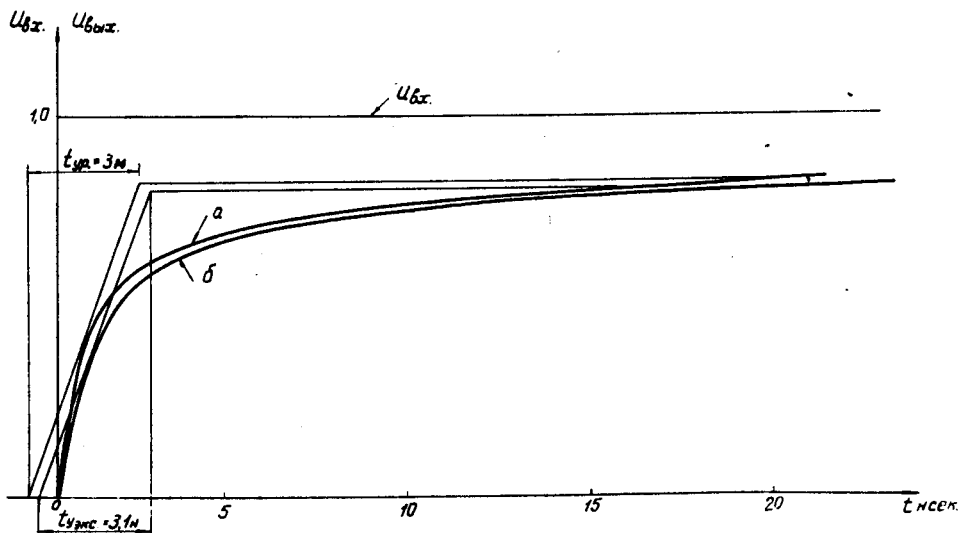


Рис. 2. Переходные характеристики кабеля РК-75-4-11 ($\ell = 50\text{м}$). а) расчётная кривая, б) экспериментальная характеристика.

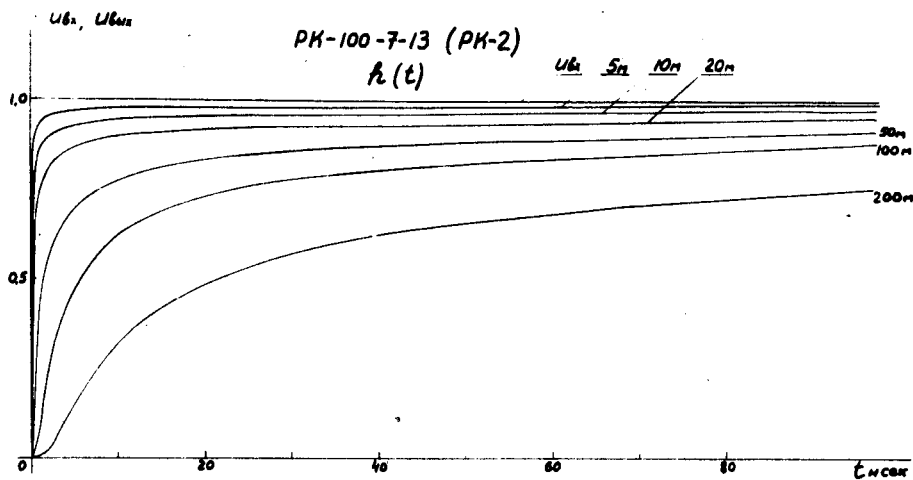


Рис. 3.

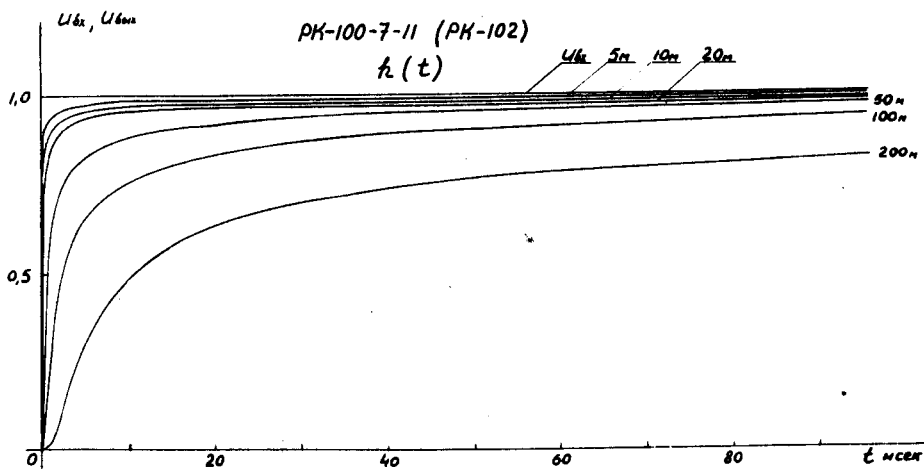


Рис. 4.

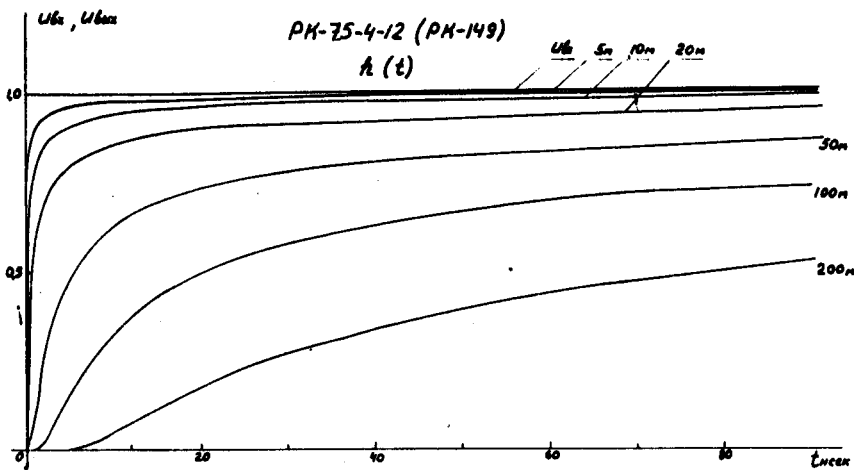


Рис. 5.

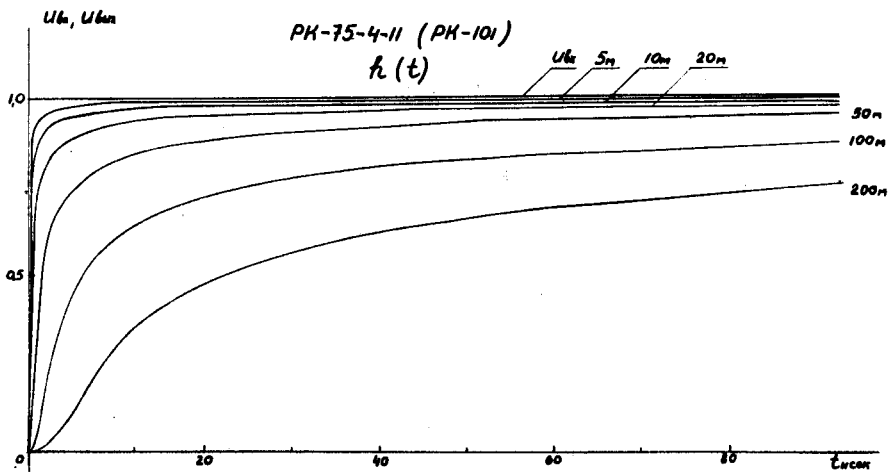


Рис. 6.

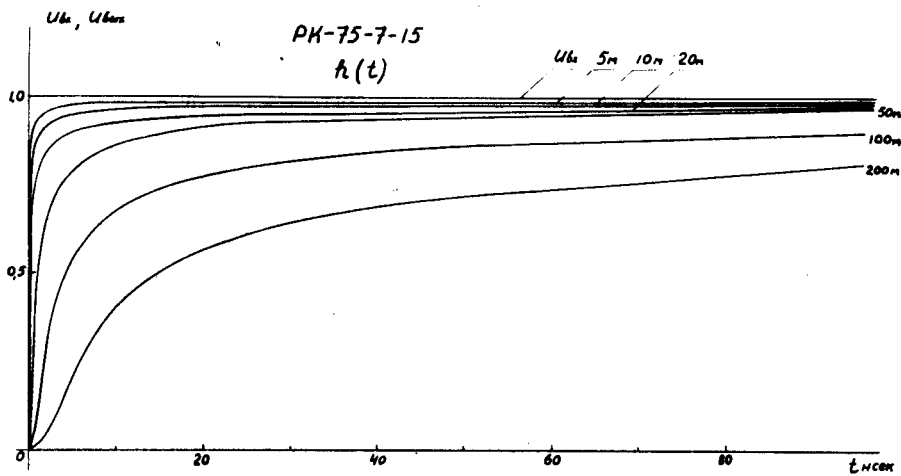


Рис. 7.

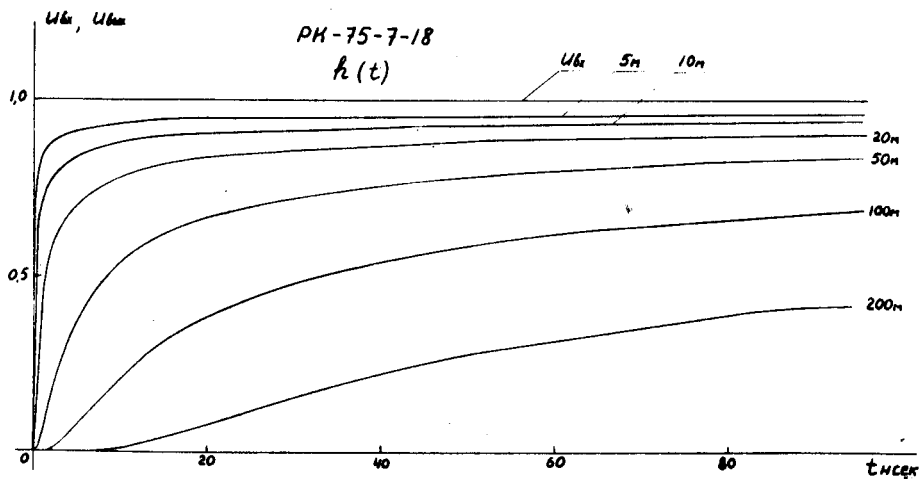


Рис. 8

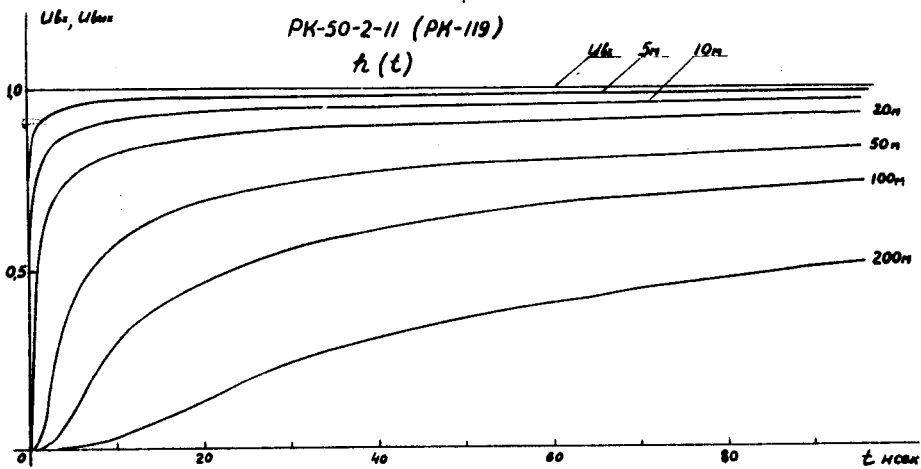


Рис. 9.

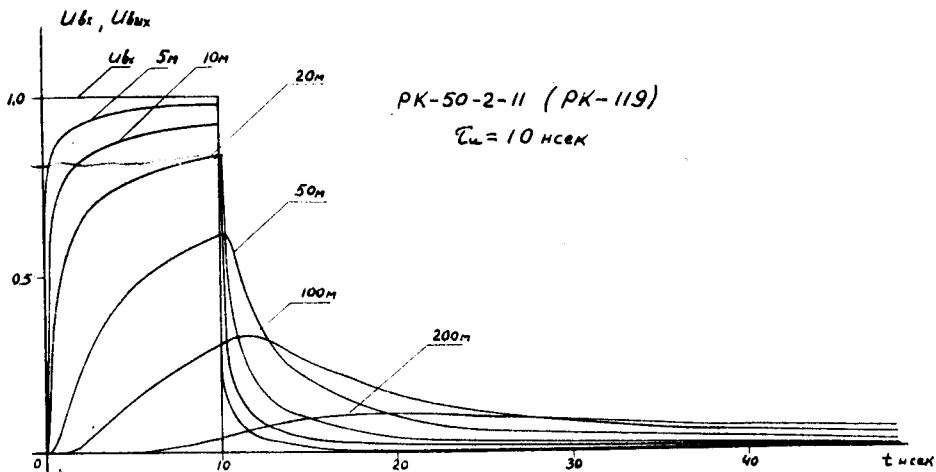


Рис. 10.

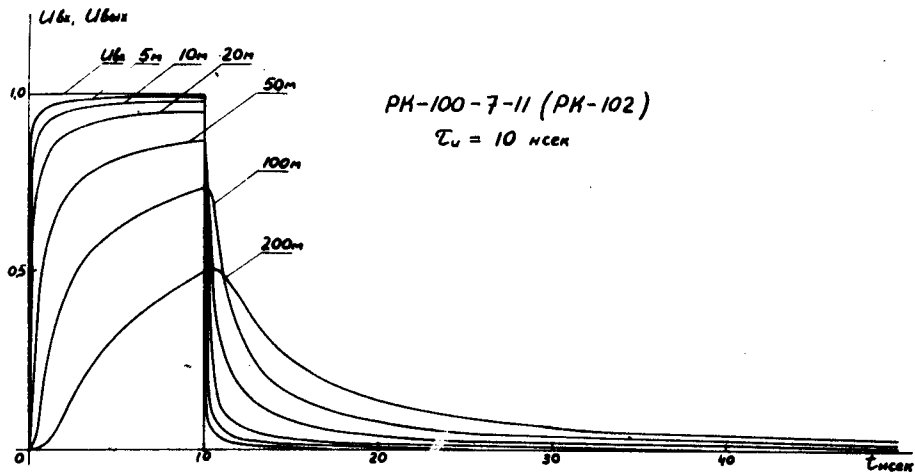


Рис. 11.

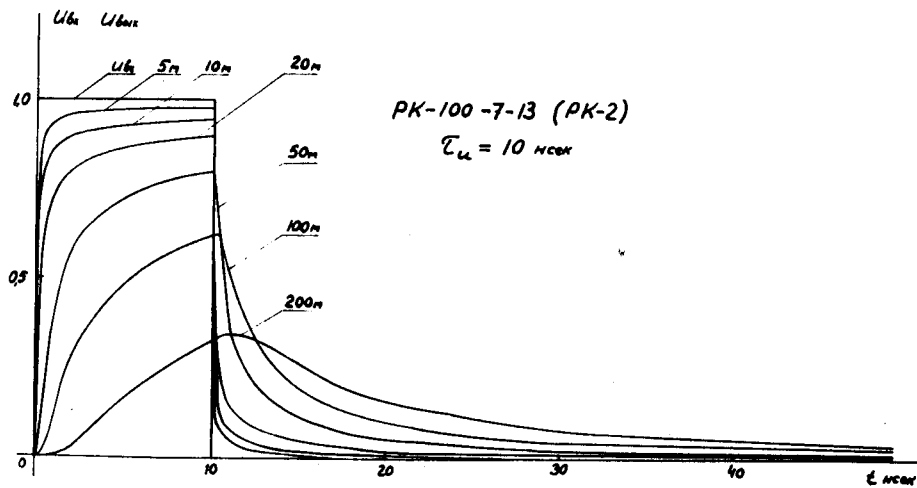


Рис. 12.

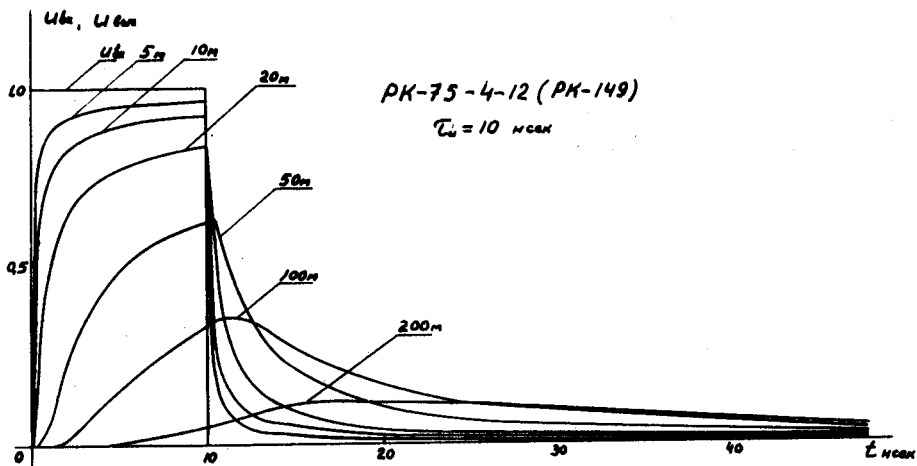


Рис. 13.

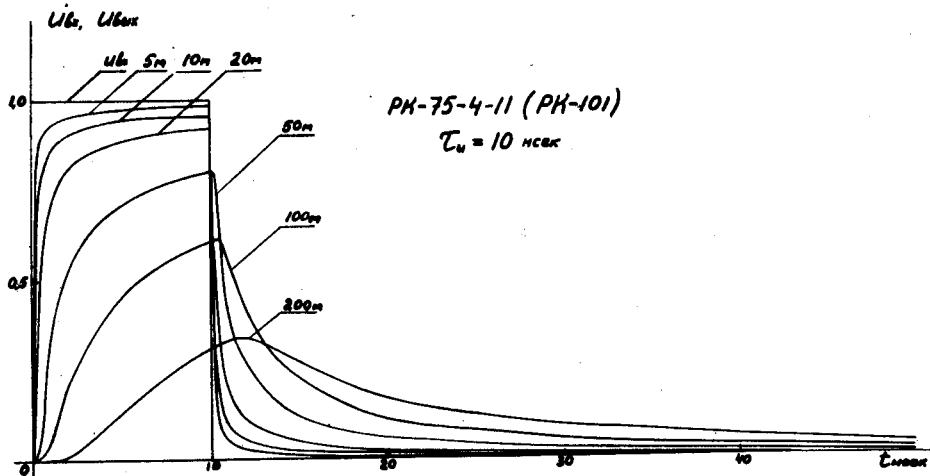


Рис. 14.

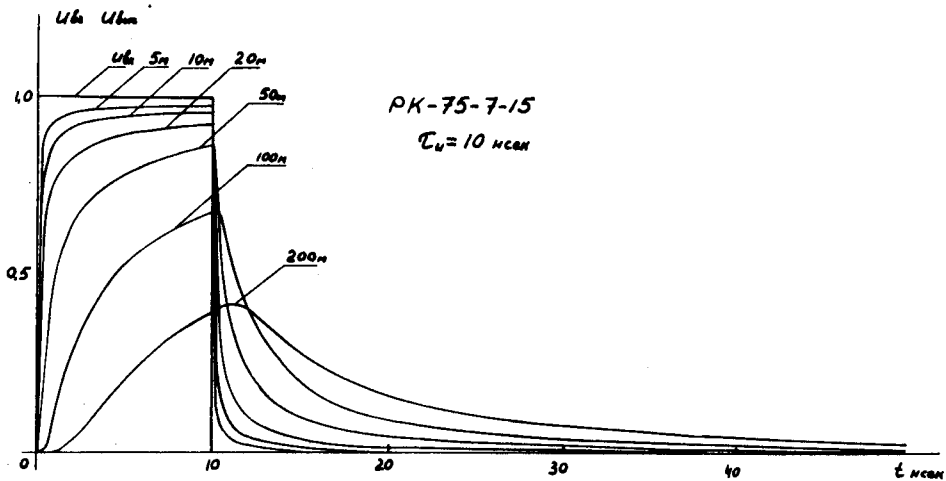


Рис. 15.

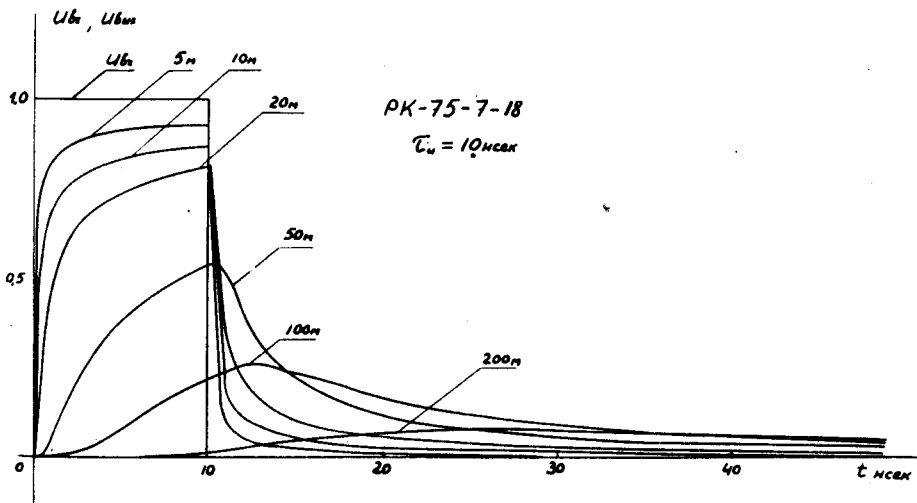


Рис. 16.

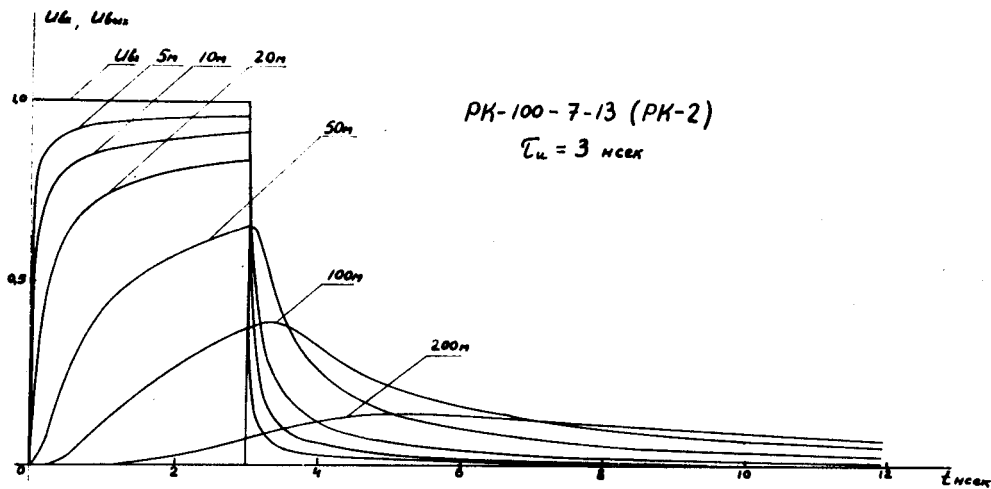


Рис. 17.

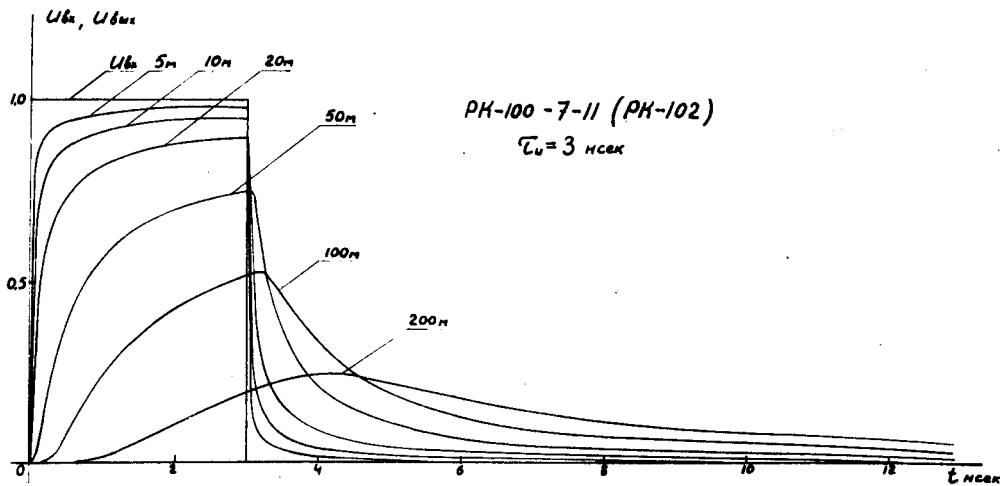


Рис. 18.

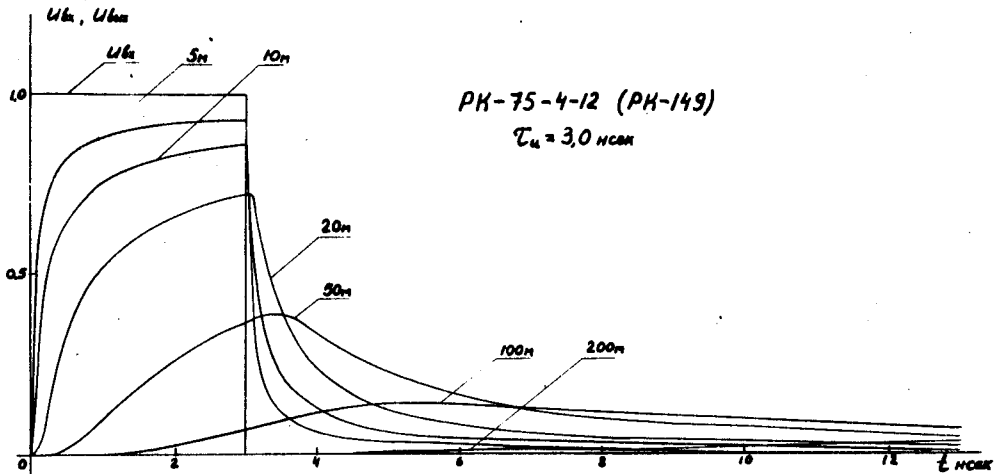


Рис. 19.

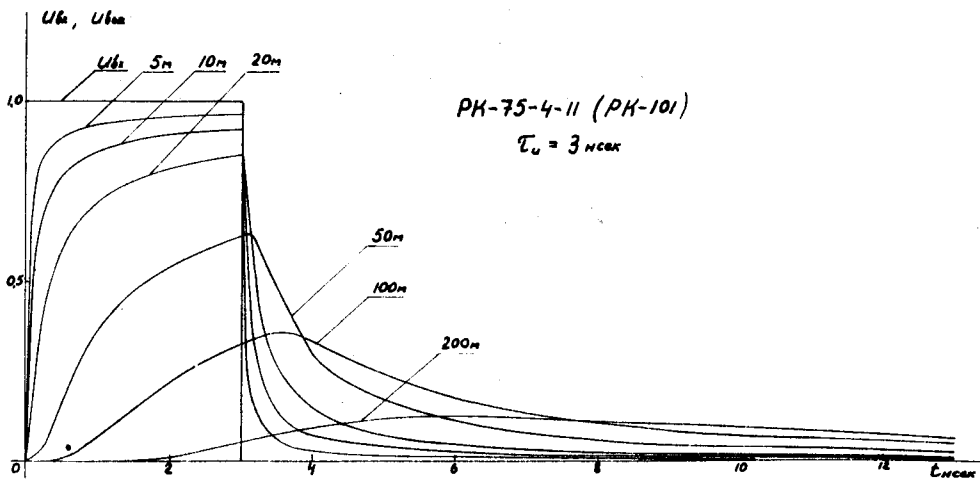


Рис. 20.

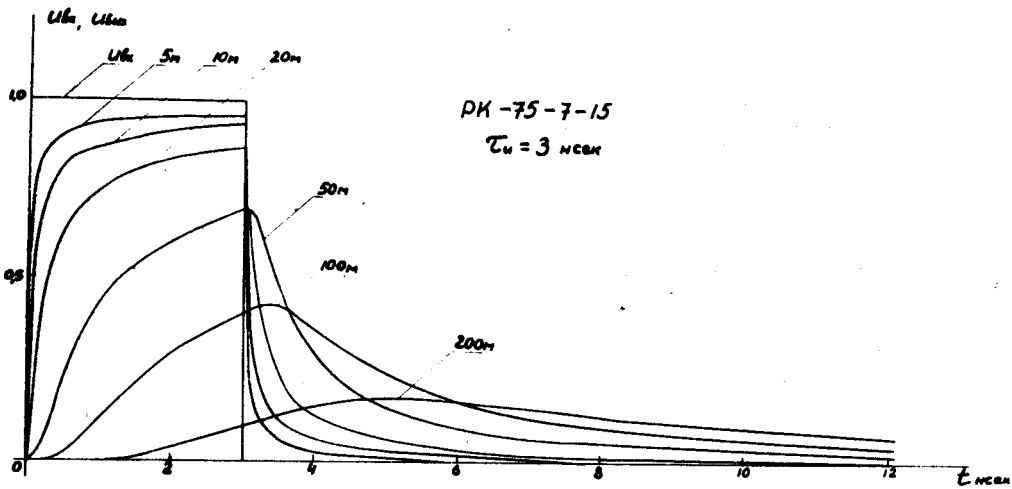


Рис. 21.

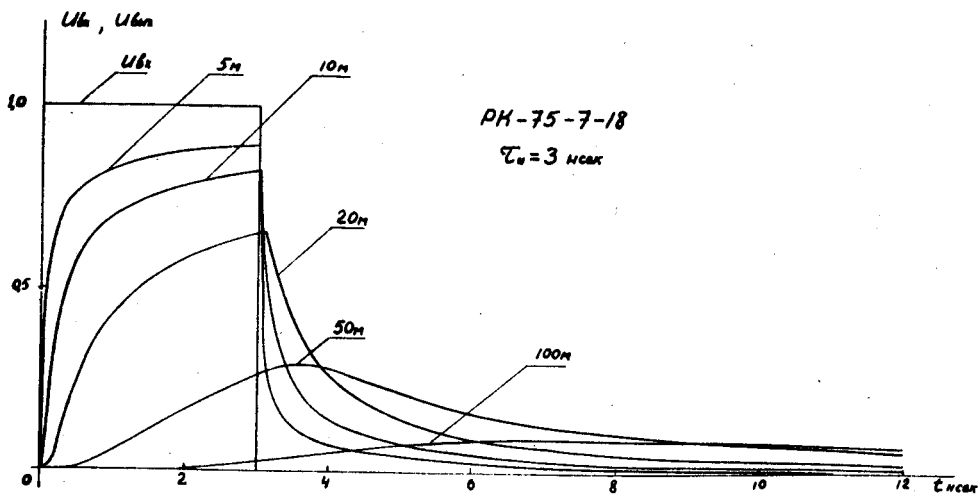


Рис. 22.

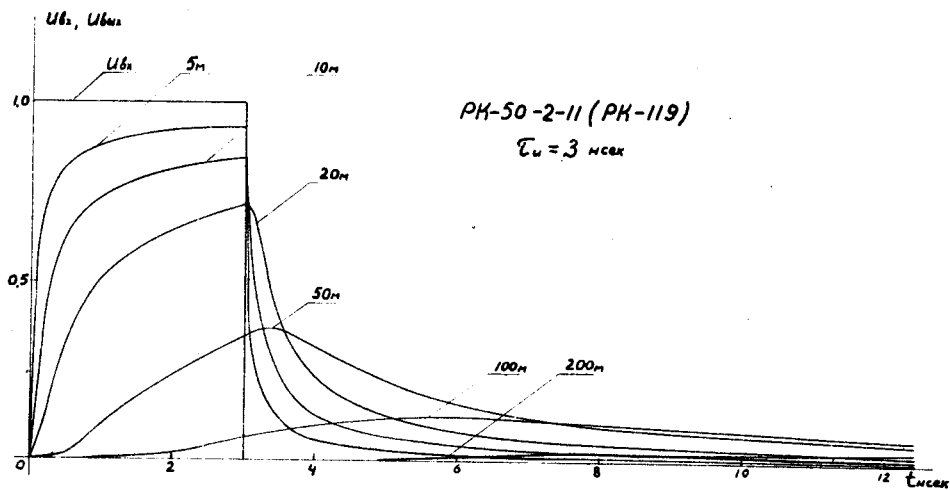


Рис. 23.