

# **Влияние формы импульса тока на процесс становления электромагнитного поля в земле**

Антонов Е. Ю., Могилатов В. С., Эпов М. И.

## **Аннотация**

Теоретические исследования и методические рекомендации в импульсной электроразведке тяготеют к такому способу импульсного возбуждения, когда постоянный ток мгновенно выключается. На практике длительность пропускания тока регламентируется глубиной зондирований, а также по экономическим и временным соображениям. Так что длительность импульса влияет на позднюю стадию становления. В ранней стадии сказывается фронт выключения, который не может быть слишком коротким по техническим причинам. В общем, возникает необходимость учесть реальные параметры токового импульса при решении прямой задачи. Кроме того, возникали в свое время идеи использовать специальную форму импульса для оптимизации зондирований (компенсационный метод переходных процессов – КМПП, например, был реализован). Мы предлагаем взглянуть на проблему более широко, с позиции разделения нестационарного геоэлектромагнитного поля на ТЕ- и ТМ-поляризации, которые возбуждаются в чистом виде разными источниками. Оказывается, зависимость от формы возбуждающего импульса у этих поляризаций может быть принципиально различной в средах с изолирующим основанием.

## **Ключевые слова:**

электроразведка, зондирования становлением, форма импульса, ТЕ-поле, ТМ-поле

## **ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ИМПУЛЬСА ТОКА НА ПРОЦЕСС СТАНОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЗЕМЛЕ**

**Е.Ю. Антонов<sup>1</sup>, В.С. Могилатов<sup>1,2</sup>, М.И. Эпов<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им А.А. Трофимука СО РАН,*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный университет*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Теоретические исследования [Ваньян, 1965] и методические рекомендации [Захаркин, 1981] в импульсной электроразведке (зондирования становлением – ЗС) тяготеют к такому способу импульсного возбуждения, когда постоянный ток мгновенно выключается. На практике длительность пропускания тока регламентируется глубиной зондирований, а также по экономическим и временным соображениям. Мы должны обеспечить необходимую энергетику, что можно сделать за счет амплитуды тока более короткого импульса. Так что длительность импульса может повлиять на регистрируемую позднюю стадию становления. В ранней стадии сказывается фронт выключения, который не может быть слишком коротким по техническим причинам. В общем, возникает необходимость учесть с достаточной точностью реальные параметры токового импульса при интерпретации. Эта проблема уже рассматривалась в разных аспектах в работах [Соколов и др., 1978; Захаркин, 1981; Эпов и др., 1996; Fitterman and Anderson, 1987; Liu, 1998]. Кроме того, появлялись в свое время идеи использовать специальную форму импульса для повышения разрешающей способности зондирований. Наиболее известная попытка в этом роде – компенсационный метод переходных процессов (КМПП), например, была вполне реализована [Исаев, 1983; Исаев, Тригубович, 1983].

Возникает вообще вопрос о возможностях оптимизации формы токового импульса с точки зрения повышения эффективности ЗС. Мы предлагаем снова взглянуть на эту проблему, но с позиции разделения нестационарного геоэлектромагнитного поля на ТЕ- и ТМ-поляризации, которые возбуждаются в чистом виде разными источниками. Оказывается, зависимость от формы возбуждающего импульса у этих поляризаций принципиально различная, если среда имеет высокоомное основание. Анализ показывает, что возможности индуктивной импульсной электроразведки, т.е. электроразведки с применением поля магнитного типа, в этом отношении сильно ограничены. Зависимость такого типа становления в поздней (наиболее результативной, глубинной) стадии от формы импульса практически исчезает, а влияет только «площадь» импульса, энергетика. Иначе зависит от формы импульса процесс установления поля электрического типа (ТМ-поле). Сохраняется зависимость от формы импульса, причем, посредством и с участием геоэлектрических параметров. Именно этот анализ составляет новый результат в данной работе.

Сначала вспомним традиционные проблемы, возникающие в индуктивной импульсной электроразведке с источниками в виде петли и линии.

## **ВЛИЯНИЕ ФРОНТА ВЫКЛЮЧЕНИЯ В ЗОНДИРОВАНИЯХ СТАНОВЛЕНИЕМ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ (ЗСБ) НА РАННЮЮ СТАДИЮ**

Каждый электроразведчик при реализации зондирований становлением (ЗС) сталкивался с необходимостью учитывать линейный (или иной) характер спада тока во время выключения генераторной петли. Известно, что отключение тока не является мгновенным и вместо ступени нужно рассматривать спад по линейному закону (рис. 1). Интервал линейного спада силы тока зависит от размера петли и на практике варьируется от единиц микросекунд до первых миллисекунд. Данный аспект метода ЗС

неоднократно рассматривался в работах геофизиков, среди которых особо следует отметить работы [Захаркин, 1981; Fitterman, 1987; Liu, 1998; Иванова, 2017]. Проблема состояла в том, что для оперативной интерпретации желательнее было применять наработанные приемы для мгновенного выключения тока.

Сравним процессы становления, возбуждаемые при линейном выключении тока и при мгновенном. Для расчетов используем соосную установку на дневной поверхности (генераторная петля радиусом 564 м, приемный датчик с эффективным моментом эквивалентным петле со стороной 100 м, ток 100 А и измерение  $dB_z/dt$  в центре) и модель среды в виде проводящего слоя ( $h=1250$  м,  $\rho=10$  Ом·м), расположенного на изоляторе. При сохранении точки отсчета ( $t=0$ ) возбуждение будем производить мгновенным выключением в моменты  $\tau = 0$ ,  $\tau = -T/2$  и  $\tau = -T$ , где  $T$  – длительность линейного фронта.

На рис. 2а представлены соответствующие кривые становления в случае  $T = 0.5$  мс. При этом кривая для линейного фронта и для мгновенно выключения в момент  $\tau = -T/2$  практически совпадают. Это известный и вполне понятный факт, который есть следствие поведения компоненты  $dB_z/dt$  в ранней стадии становления и вообще плавности и линейности процесса становления в пределах небольшого промежутка времени. Однако, надо помнить, что при использовании других компонент, при увеличении длительности фронта и при нелинейных искажениях рекомендация заменять плавное выключение мгновенным, сдвигая процесс на величину  $T/2$ , может оказаться некорректной. На рис. 2б показаны аналогичные кривые для линейного фронта 5 мс, и совпадение не наблюдается.

Разумеется, в современную эпоху наиболее правильной рекомендацией будет фиксация в поле реальной формы импульса и применение математического обеспечения, в полной мере учитывающего форму импульса. Такое обеспечение стало, собственно, нормой.

## **ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ИМПУЛЬСА В ПОЗДНЕЙ СТАДИИ ИНДУКТИВНЫХ (ПЕТЛЯ И ЛИНИЯ) ЗС**

Общеизвестно, что при ступенчатом выключении тока асимптотика переходных характеристик электромагнитных полей, применяемых в индуктивных ЗС, при  $t \rightarrow \infty$  имеет вид:

$$F(t) \approx \frac{A}{t^\alpha}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – целое или дробное число.

Для любого типа источника и произвольной компоненты поля показатель степенной зависимости может быть получен формально путём анализа имеющихся аналитических выражений в поздней стадии становления для простых моделей, например проводящего полупространства или проводящая плоскость в воздухе. Очевидно также, что для выражения вида (1) легко показать решение этой задачи чисто графически, построив отношение вида:

$$\alpha = \frac{\lg |F(t) / F(t + \Delta t)|}{\lg [(t + \Delta t) / t]}, \quad (2)$$

где  $F(t)$  - переходная характеристика компоненты поля,  $t$  – время,  $\Delta t$  - малое приращение времени. На рис. 3 показаны соответствующие графики выражения (2), рассчитанного для электрических и магнитных компонент, возбуждаемых генераторами в виде петли и электрической линии для проводящего полупространства. Особым случаем являются вычисления степенной характеристики электрической компоненты ортогонального направлению генераторной линии, которая на поверхности проводящего неполяризуемого полупространства равна нулю (в нашем случае это

компонента  $E_y$ ). Для нее параметр  $\alpha$  вычислялся в модели проводящего полупространства, перекрытого тонким слоем. Расчеты выполнялись для выключения постоянного тока.

Для удобства, сведения о порядке степенной зависимости представлены в Таблице 1.

Для прямоугольного токового импульса продолжительностью  $\Delta\tau$  (рис. 4) асимптотика поля при достаточно больших  $t$  представляется выражением [Уэйт, 1987, с. 190]:

$$\begin{aligned} \Delta\tau E(t) = E_0(t+\tau) - E_0(t+\tau+\Delta\tau) &\approx \frac{A}{(t+\tau)^\alpha} - \frac{A}{(t+\tau+\Delta\tau)^\alpha} = \\ &= \frac{A}{t^\alpha} \frac{1}{(1+\bar{\tau})^\alpha} - \frac{1}{(1+\bar{\tau}+\Delta\bar{\tau})^\alpha} \approx E_0(t) \frac{1}{(1+\bar{\tau})^\alpha} - \frac{1}{(1+\bar{\tau}+\Delta\bar{\tau})^\alpha} \end{aligned} \quad (3)$$

здесь и далее  $E_0(t)$  – отклик на возбуждение бесконечной ступенью постоянного тока, а  $\bar{\tau} = \tau/t$ .

На рис. 5 показана зависимость измеряемых сигналов от продолжительности зондирующего импульса. Сплошными линиями на рис. 5а и 5б показаны отклики на выключение **бесконечной** ступени постоянного тока, пунктирными линиями – отклики на прямоугольные импульсы длительностью 0.1, 0.25 и 0.5 с. Расчеты выполнены для компоненты  $\frac{\partial B_z}{\partial t}$  для генераторов типа петля – рис. 5а и электрическая линия – рис. 5б. Очевидно, что рис. 5 дает наглядную иллюстрацию выражения (3), показывая, что независимо от типа установки возбуждения-регистрации продолжительность зондирующего импульса  $\Delta\tau$  проявляется в сигнале на временах, сопоставимых и превосходящих её, т.е. при  $t \geq \Delta\tau$ .

Воспользовавшись выражением (3), для прямоугольного импульса длительности  $T$  легко вывести выражение следующего вида:

$${}^T E(t) \approx E_0(t) \frac{\alpha}{t} \int_0^T \frac{d\tau}{(1+\bar{\tau})^{\alpha+1}} = E_0(t) \cdot I(T). \quad (4)$$

Интеграл в (4) может быть взят в явном виде [Градштейн, Рыжик, 1963] и имеет вид:

$$I(T) = \frac{\alpha}{t} \int_0^T \frac{d\tau}{(1+\bar{\tau})^{\alpha+1}} = \frac{\alpha}{t} \left[ -\frac{1}{\alpha(1+\bar{\tau})^\alpha} \right]_0^T = 1 - \frac{1}{(1+\bar{T})^\alpha}, \quad (5)$$

где  $\bar{\tau} = \tau/t$ ,  $\bar{T} = T/t$ .

Из выражения (5) следует, что  $\lim_{T \rightarrow \infty} I(T) = 1$ , поэтому увеличивая длительность прямоугольного импульса, в пределе, мы получим в выражении (4) поле от выключения бесконечной ступени тока  $E_0(t)$ . Для малых значений  $t$  предел  $\lim_{t \rightarrow 0} I(t)$  также имеет значение равное 1. Это означает, что выражение (4) корректно и на ранних временах становления для  $t < T$ , т.к. на ранних временах влияние переднего фронта (включение) ничтожно. Данный факт подтверждается расчетами, результаты которых представлены на рис. 6. На рис. 6а приведены графики эдс в приемной петле для бесконечной ступени (сплошная линия), расчетная кривая (кресты) для прямоугольного импульса длительностью 50 мс и расчет кривой для прямоугольного импульса по формуле (4) – пунктирная линия. Справа, на рис. 6б приводится график относительного отклонения точной и приближенной эдс, рассчитанных для прямоугольного импульса. Как можно видеть относительное отклонение кривых не превышает 0.1 %. Таким образом, показано, что выражение (4) эффективно заменяет вычисление интеграла типа свертки при расчете переходных характеристик от воздействия прямоугольных импульсов.

Поскольку импульс специальной формы может быть сконструирован из серии коротких импульсов, выражение (4) может быть обобщено для случая,

когда токовый импульс описывается произвольной функцией  $q(\tau)$ , при условии  $q(0) = q(T) = 0$ :

$${}^q E(t) \approx E_0(t) \frac{\alpha}{t} \int_0^T \frac{q(\tau) d\tau}{(1+\bar{\tau})^{\alpha+1}}. \quad (6)$$

На рис. 7 приводятся результаты расчетов переходных эдс для импульса вида  $q(t) = \sin \frac{\pi t}{T}$  ( $T=50$  мс), установка петля-петля. На рис. 7а приведены графики эдс в приемной петле для бесконечной ступени (сплошная линия) и расчетные кривые для полусинусоидального импульса: точный расчет (пунктирная линия), расчет приближенного выражения (6) - (крестики). На рис. 7б приводится график относительного отклонения точной и приближенной эдс рассчитанных для специального импульса  $q(t)$ . Как можно видеть из рис. 7б приближение (6) не работает на ранних временах и корректно для поздних времен становления, относительное отклонение кривых становится меньше 1 % начиная с времен больше 10 мс.

## **КОМПЕНСАЦИОННЫЙ МЕТОД ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ (КМП)**

Формула (6) для поздней стадии становления при возбуждении произвольным импульсом не дает много возможностей оптимизировать процесс становления с целью лучшего выделения особенностей геореза, поскольку в формуле разрез никак не присутствует. По сути, формула (6) утверждает, что форма импульса теряет свое значение к концу процесса становления. Тем не менее, возможны «поправки» к ступенчатому выключению тока, которые полезны на более ранних стадиях становления. В свое время предлагались идеи использовать специальную форму импульса

для оптимизации зондирований. Наиболее известная попытка в этом роде – компенсационный метод переходных процессов (КМПП), например, была вполне реализована [Исаев, 1983; Исаев, Тригубович, 1983].

Суть предложения состояла в том, что перед окончательным выключением в петлю подавался короткий импульс с противоположной основному полярностью. При этом кривая становления (для соосной установки) также меняет знак. В узком интервале времен, где отклик меняет полярность (знак), относительный вклад в него от аномального объекта увеличивается. Рассмотрим это подробно, используя модель среды в виде однородного слоя ( $h=1200$  м,  $\rho=10$  Ом·м), в который на глубине 1000 м включен аномальный объект – проводящий горизонт мощностью 50 м и сопротивлением 2 Ом·м. На рис. 8 показаны сравнения нормальных и суммарных полей для выключения и при добавлении «компенсирующего» импульса. Форма импульса показана на рис. 8б так, как это принято было в КМПП – основной импульс отрицательный, длительностью до 500 мс, компенсирующий – положительный, в данном случае около 20 мс. Предлагалось анализировать сигнал в области смены знака. Поскольку на отдельной кривой данных оказывалось мало и надежность их невысока, было предложено воздействовать на среду серией импульсов (до 10) с разной длительностью компенсирующего импульса. Эта серия представлена на рис. 9, где также приведены отклики. Все это было реализовано, построена соответствующая аппаратура (управляемый коммутатор тока) и были проведены обширные полевые работы в Австралии. К сожалению, различные, объективные и субъективные обстоятельства в начале 90-х годов остановили это развитие. Метод приводит к использованию более разнообразных и независимых данных, но ценой значительного усложнения аппаратуры. Все же, по нашему мнению, на основании формулы (6), принципиального прорыва не произошло.

## ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЦЕССА СТАНОВЛЕНИЯ ТМ-ПОЛЯ ОТ ФОРМЫ ИМПУЛЬСА

Рассмотрим теперь влияние сложной формы импульса на процесс установления поля электрического типа (ТМ-поле). Нестационарное ТМ-поле можно возбуждать

вертикальным электрическим диполем (ВЭД), либо, с поверхности земли, круговым электрическим диполем (КЭД, рис. 10). Устанавливающееся поле ТМ-поляризации ведет себя принципиально иначе, нежели ТЕ-поле. Вот, например, в двухслойной среде с изолирующим основанием ( $h_1=h, \rho_1=\rho, \rho_2=\infty$ ) в поздней стадии ( $t \rightarrow \infty$ ) для токовой петли при возбуждении ступенчатым выключением тока имеем:

$$E_{\phi}^0(t) \cong M_z \cdot \frac{3r\rho}{2\pi h} \left[ \frac{\mu_0 h}{2\rho t} \right]^4, \quad (7)$$

а для поля ВЭД и КЭД, имеющего радиальное электрическое поле:

$$E_r^0(t) \cong C \cdot \frac{r\rho}{\pi h^3} \left[ \frac{\mu_0 h}{2\rho t} \right]^2 \cdot \exp \left[ -\frac{\pi^2 \rho t}{\mu_0 h^2} \right], \quad (8)$$

где коэффициент  $C = Idz_0 \cdot z_0$  в случае ВЭД и  $C = Ib^2 / 4$  в случае КЭД ( $Idz_0$  и  $z_0$  – момент и положение ВЭД,  $I$  и  $b$  – ток и радиус КЭД, [Могилатов, 1997, 2014]).

В таком случае, нетрудно получить формулу поздней стадии процесса становления от КЭД (или ВЭД) для произвольного импульса  $q(t)$ .

$${}^a E_r(t) = E_r^0(t) \cdot \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{dq(\tau)}{d\tau} \exp\left\{ \frac{\pi^2 \rho \tau}{\mu_0 h^2} \right\} d\tau. \quad (9)$$

Если определять произвольный импульс значениями в ограниченном наборе времен ( $a_i, \tau_i, i=1,2,\dots,N$ ), полагая линейное изменение между ними (без мгновенных скачков), то формула (9) обращается в:

$${}^a E_r(t) = E_r^0(t) \cdot \frac{\mu_0 h^2}{\pi^2 \rho} \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \left[ \exp\left\{ \frac{\pi^2 \rho \tau_{i+1}}{\mu_0 h^2} \right\} - \exp\left\{ \frac{\pi^2 \rho \tau_i}{\mu_0 h^2} \right\} \right] \cdot \frac{a_{i+1} - a_i}{\tau_{i+1} - \tau_i}. \quad (10)$$

На рис. 11 иллюстрируется применение формулы (10). Представлены расчеты для двухслойного разреза ( $h_1=1500$  м,  $\rho_1=10$  Ом·м,  $\rho_2=\infty$ ). Сравниваются точный расчет для полусинусоидального импульса и приближенный по формуле (10).

Важная особенность формулы (10), в отличие от формулы (6) для источника-петли, состоит в том, что в поздней стадии сохраняется зависимость от формы импульса, причем, посредством и с участием геоэлектрических параметров. Это позволяет «управлять» откликом в поздней стадии с целью усиления аномального эффекта. На рис. 12 сравниваются относительные различия суммарного и нормального полей при применении ступеньки и **полусинусоидального** импульса (рис. 12а). Относительный вклад аномального объекта (проводящий горизонт, рис. 12б) растет с увеличением времени (рис. 12в), это характерное следствие экспоненциального спада в поздней стадии. Но в случае синусоидального импульса этот рост значительно больше.

Конечно, нужно иметь в виду диапазон реально измеримого сигнала (он ограничен стрелкой на рис. 12). Но вывод остается в силе.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Развитие импульсного метода электроразведки постепенно решает вопрос о влиянии формы импульса и об учете этого влияния в ранней и поздней стадии посредством всеобщего внедрения соответствующего математического обеспечения. Однако потребность в оперативном приближенном учете всегда актуальна. Кроме того, есть вопрос об оптимизации зондирований становлением при использовании сложной формы импульса. Мы показали, что возможности в этом отношении в индуктивной импульсной электроразведке (т.е. основанной на применении ТЕ-поля) принципиально ограничены, поскольку форма питающего импульса не влияет на позднюю стадию.

Практическое использование нестационарного ТМ-поля началось недавно и принесло много довольно необычных методических и интерпретационных проблем. Наконец и старый вопрос о форме возбуждающего импульса в электроразведке ЗС, казалось, не очень интересный в традиционной индуктивной электроразведке, получает новое и интересное развитие в рамках «ТМ-электроразведки».

## **ЛИТЕРАТУРА**

Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. М.: Недра, 1965. 109с.

Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М.: Физматгиз. – 1963. – 1100 с.

Иванова И.И. Оценка влияния фронта выключения тока источника в методе ЗСБ при обнаружении субвертикальных трубчатых объектов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр., 17–21 апреля 2017 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки

месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология»: сб. материалов в 4 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2017. - Т. 3. № 4. – с. 3-8.

Исаев Г.А. Компенсационный вариант метода переходных процессов // Методика геофизических поисков и изучения глубокозалегающих рудных месторождений Сибири. – Новосибирск, 1983. - С. 71-81.

Исаев Г.А., Тригубович Г.М. Элементы методики измерений, обработки и интерпретации в компенсационном варианте МПП // Методика геофизических поисков и изучения глубокозалегающих рудных месторождений Сибири. – Новосибирск, 1983. - С. 82-90.

Соколов В.П., Табаровский Л.А., Рабинович Б.И. Преобразование переходных характеристик для импульсов сложной формы. // Теория и опыт применения электромагнитных полей в разведочной геофизике. - Сб. научных трудов. - ИГиГ СО АН СССР. - Новосибирск, 1978. - с. 81-92.

Методические рекомендации по электроразведочным работам методом ЗСБ с аппаратурой «Цикл-2» (составитель А.К. Захаркин). Новосибирск: СНИИГГиМС. - 1981. - 98 с.

Могилатов В.С. Импульсная геоэлектрика. Новосибирск: НГУ. - 2014. - 180 с.

Могилатов В.С. Индуктивный, смешанный и гальванический источники в электроразведке становлением поля. // Изв. РАН. Сер.: Физика Земли.- 1997. - N 12. - с.42-51.

Уэйт Дж.Р. Геоэлектромагнетизм: Пер. с англ. Ред. Пер. М.Н. Бердичевский. – М.: Недра. 1987. – 235 с., ил. Пер. изд.: США. 1982.

Эпов М.И., ду Плой А., Никитенко М.Н., Ельцов И.Н. Повышение разрешающей способности по глубине в индукционных электромагнитных зондированиях // Геология и геофизика, 1996, т. 37, № 4, с. 83-90.

Fitterman D.V., Anderson W.L. Effect of Transmitter Turn-Off Time on Transient Soundings // Geop exploration, 24 (1987) 131-146.

Liu G. Effect of transmitter current waveform on airborne TEM response // Exploration Geophysics (1998) 29, 35-41.

К статье Е.Ю. Антонова, В.С. Могилатова, М.И. Эпова «Влияние формы импульса тока на процесс становления электромагнитного поля в земле»

#### Список рисунков

Рис. 1. Линейный фронт выключения тока

Рис. 2. Кривые становления для линейного фронта (а - 0.5 мс и в - 5 мс) и мгновенного выключения в моменты начала фронта, середины и конца

Рис. 3. Показатели степенной зависимости поздней стадии становления для компонент электрического и магнитного полей

Рис. 4. Прямоугольный импульс

Рис. 5. Влияние продолжительности прямоугольного импульса на сигнал в методе ЗСБ.

Установки: а). петля-петля, б). линия-петля. Шифр кривых – длительность прямоугольного импульса: бесконечная ступень, 0.1 с, 0.25 с, 0.5 с

Рис. 6. Расчет откликов конечного прямоугольного импульса по точным и приближенным

формулам: а)  $E_0$  - бесконечная ступень тока,  $E$  - прямоугольный импульс расчет свертки,

$E_0 I(T)$  - прямоугольный импульс расчет по формуле (4); б) относительное отклонение

точной и приближенной кривых  $\frac{[E - E_0 I(T)]}{E} \cdot 100\%$

Рис. 7. Расчет откликов специального импульса по точным и приближенным формулам: а).  $E_0$  - бесконечная ступень тока,  $E$  - расчет свертки,  $E_0 I(T)$  - расчет по формуле (6); б).

относительное отклонение точной и приближенной кривых  $\frac{[E - E_0 I(T)]}{E} \cdot 100\%$

Рис. 8. Компенсационный метод переходных процессов (КМПП). Сравнение нормального и суммарного полей в случае простого выключения (а), сложный импульс (б) и сравнение откликов от сложного импульса (в)

Рис. 9. Серия импульсов и отклики

Рис. 10. Идеальный и реальный круговой электрический диполь

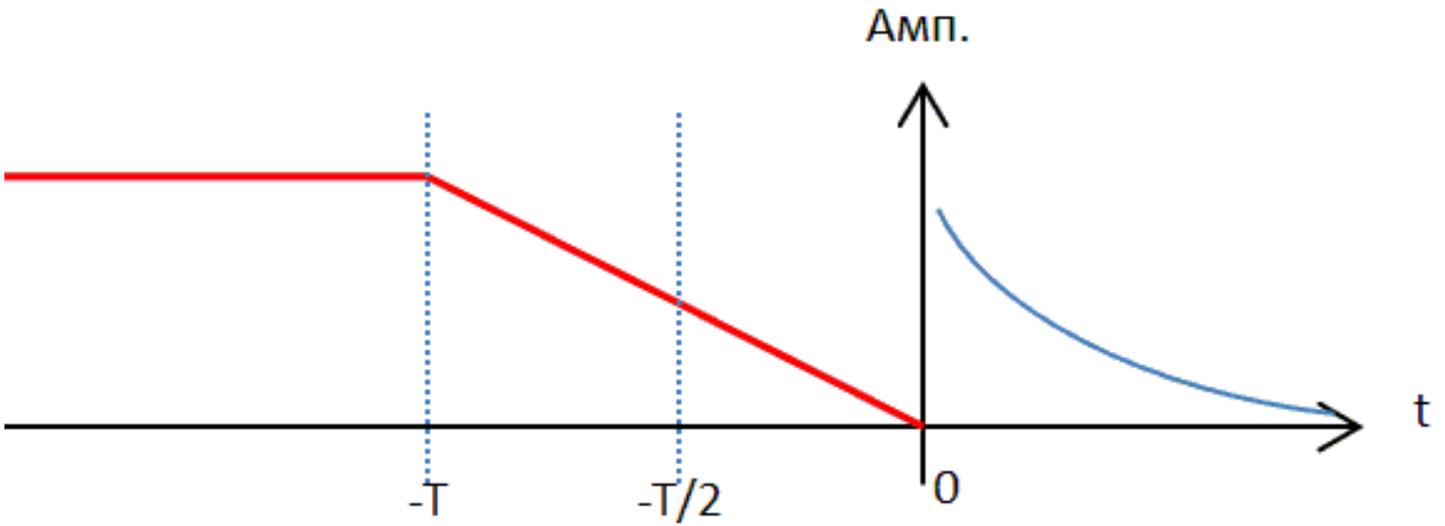
Рис. 11. Иллюстрация к формуле (10). Сравнение расчетов

Рис. 12. Влияние формы импульса на аномальный эффект в поздней стадии становления поля

Таблица 1.

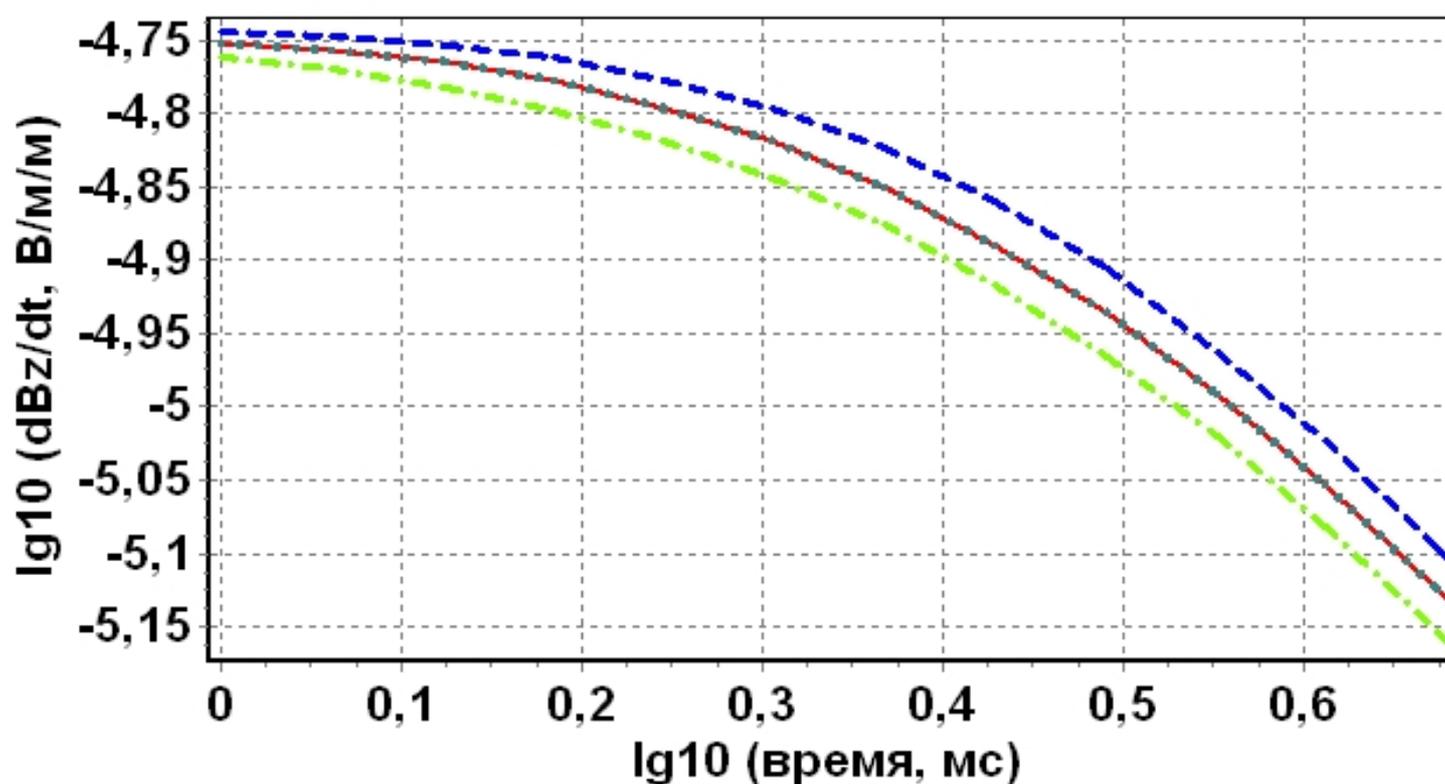
Параметры степенной зависимости электромагнитных полей  
в поздней стадии становления

Источник петля $M_z$ , компонента	$H_r$	$H_z$	$\partial B_r / \partial t$	$\partial B_z / \partial t$
$\alpha$	2	3/2	3	5/2
Источник линия $L_x$ , компонента	$E_x$	$E_y$	$H_z$	$\partial B_z / \partial t$
$\alpha$	3/2	3	3/2	5/2



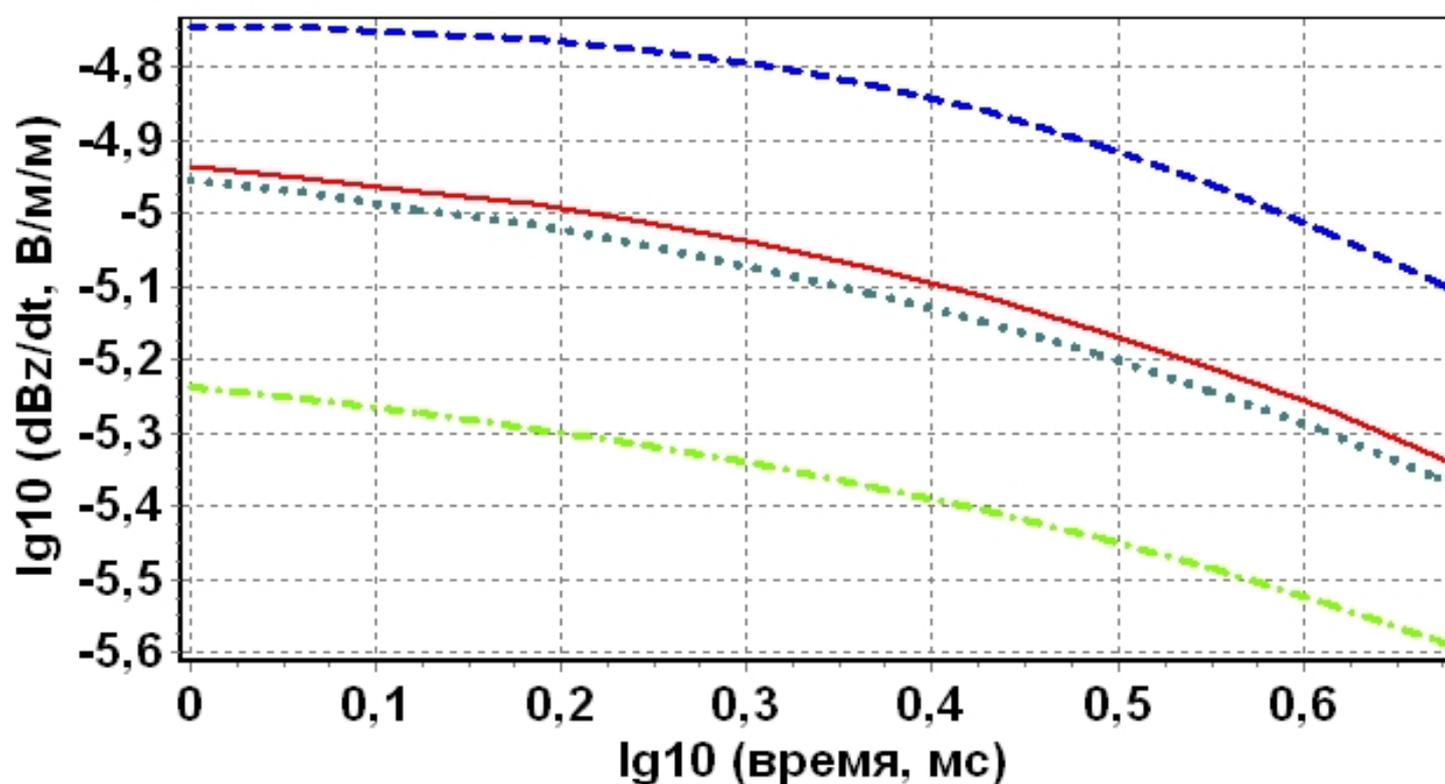
### Линейный фронт 0.5 мс

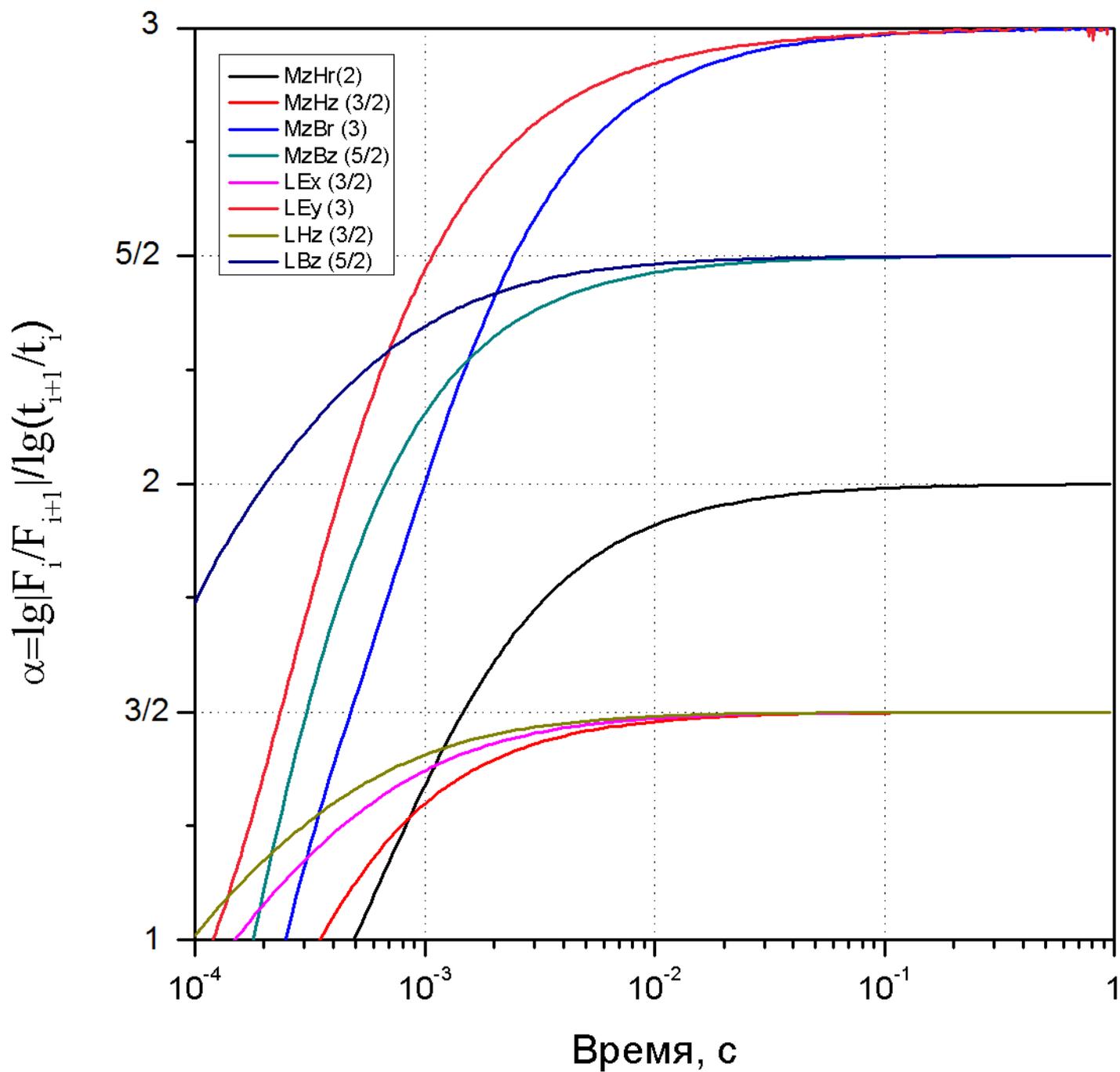
- линейный фронт
- ступенька в конце фронта
- ступенька в середине
- ступенька в начале

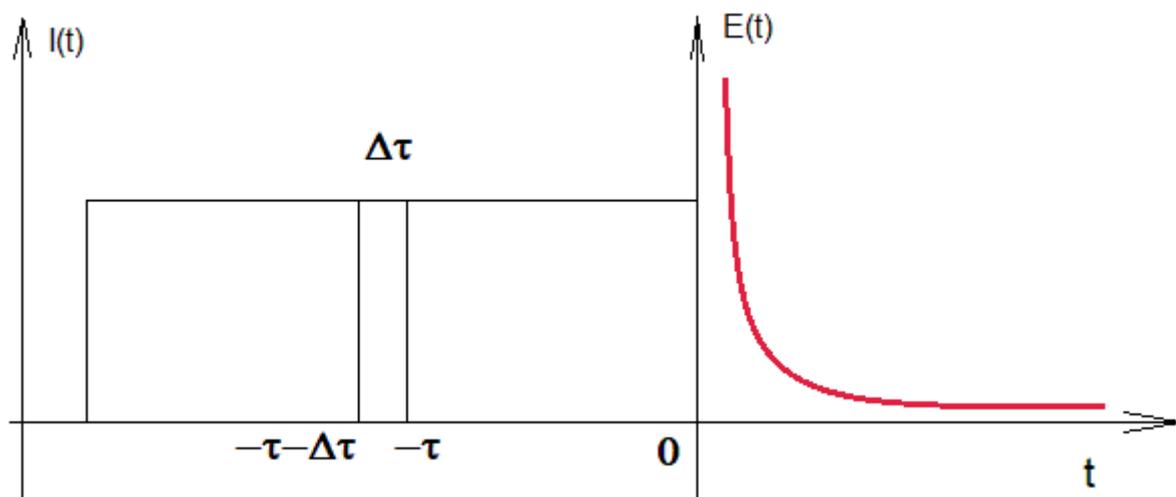


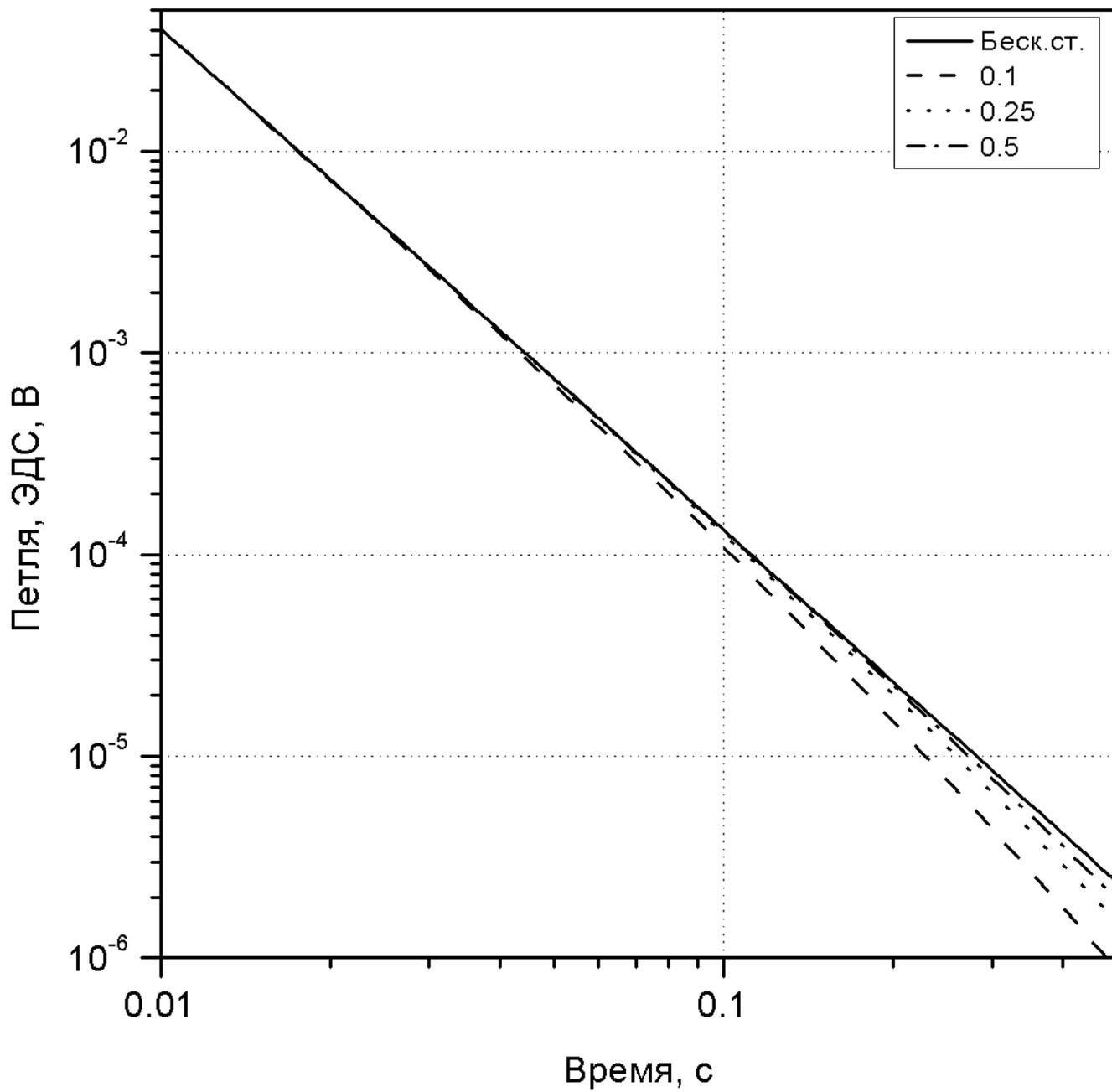
### Линейный фронт 5 мс

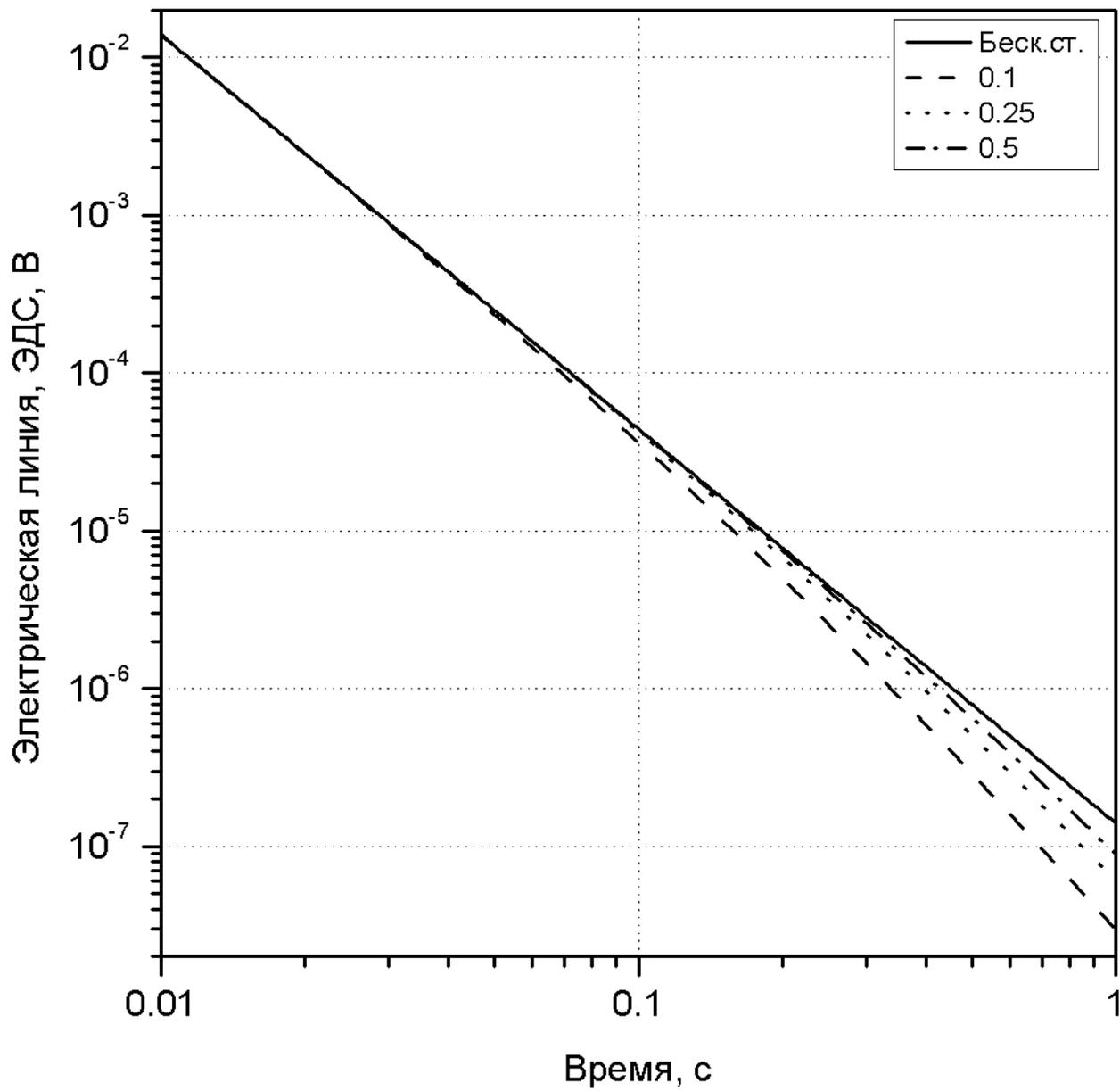
- линейный фронт
- ступенька в конце фронта
- ступенька в середине
- ступенька в начале

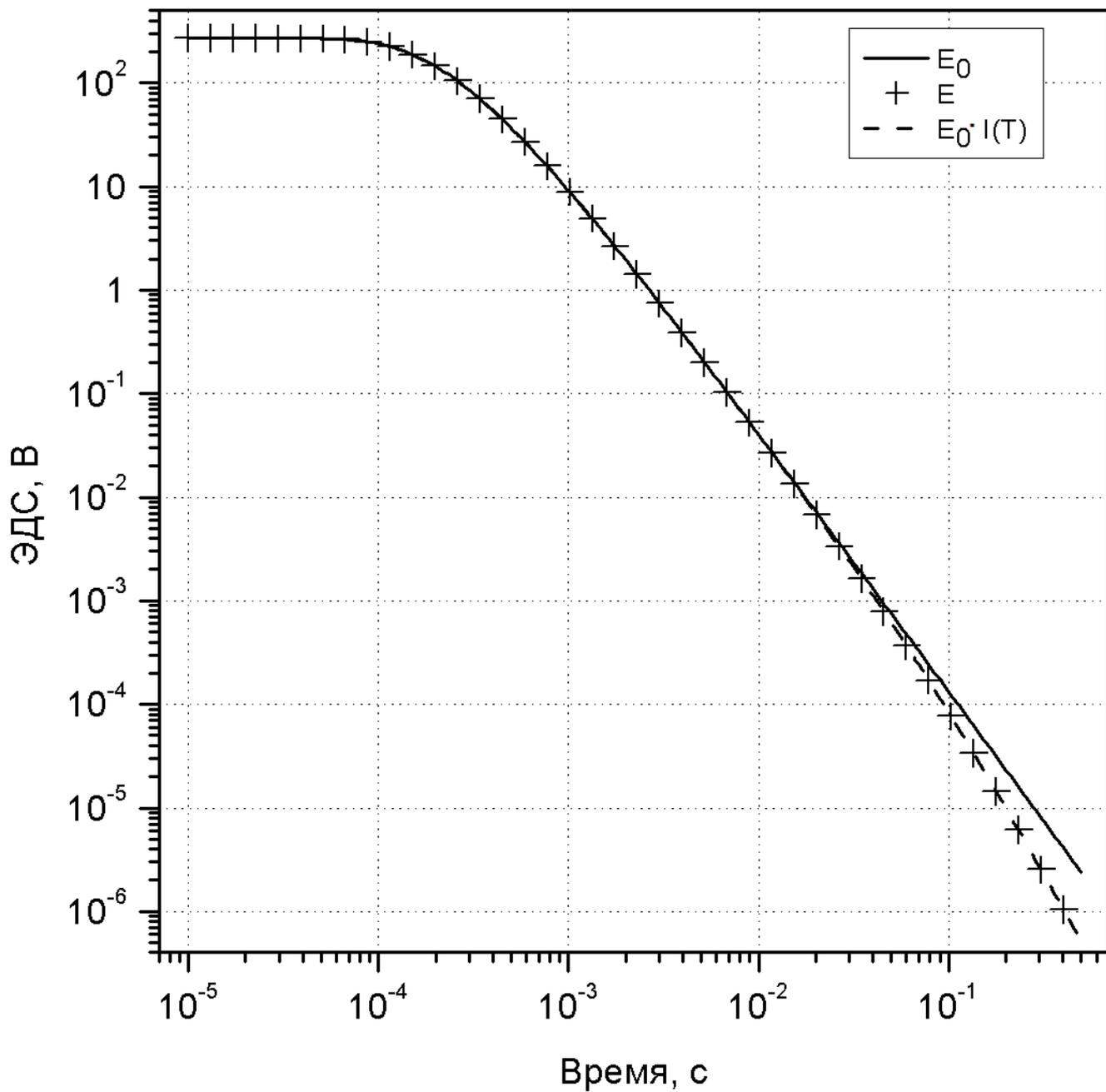


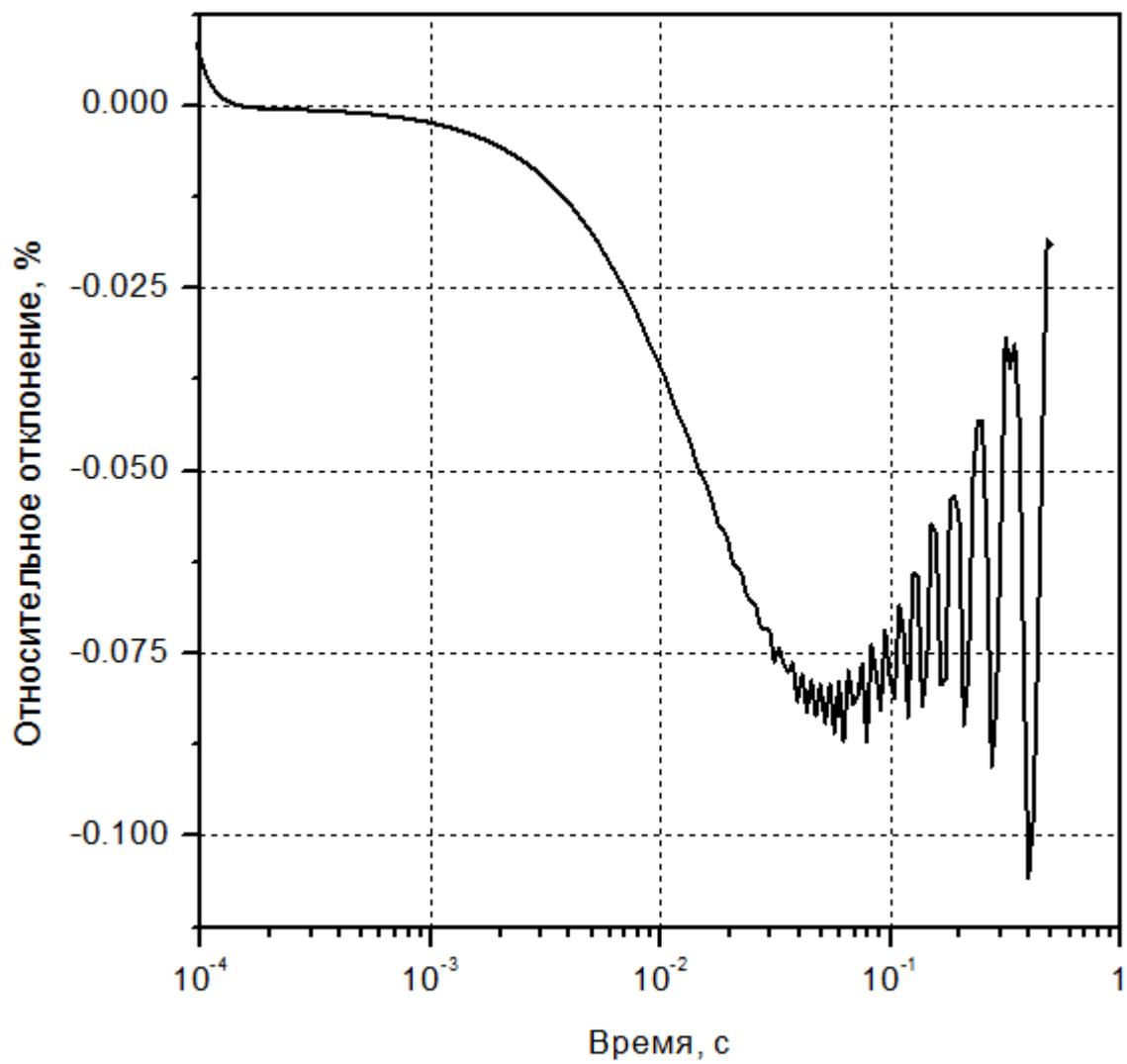


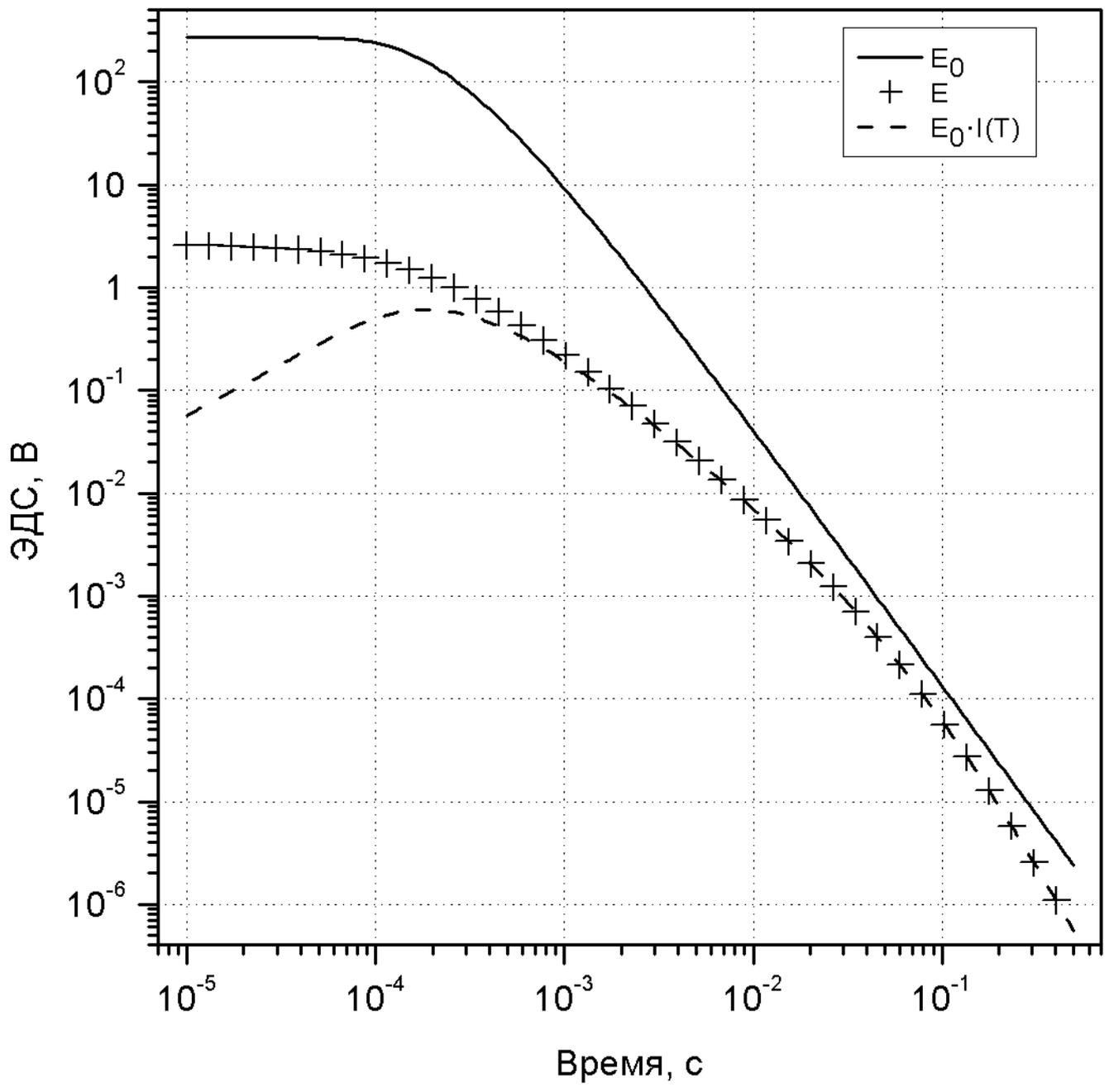


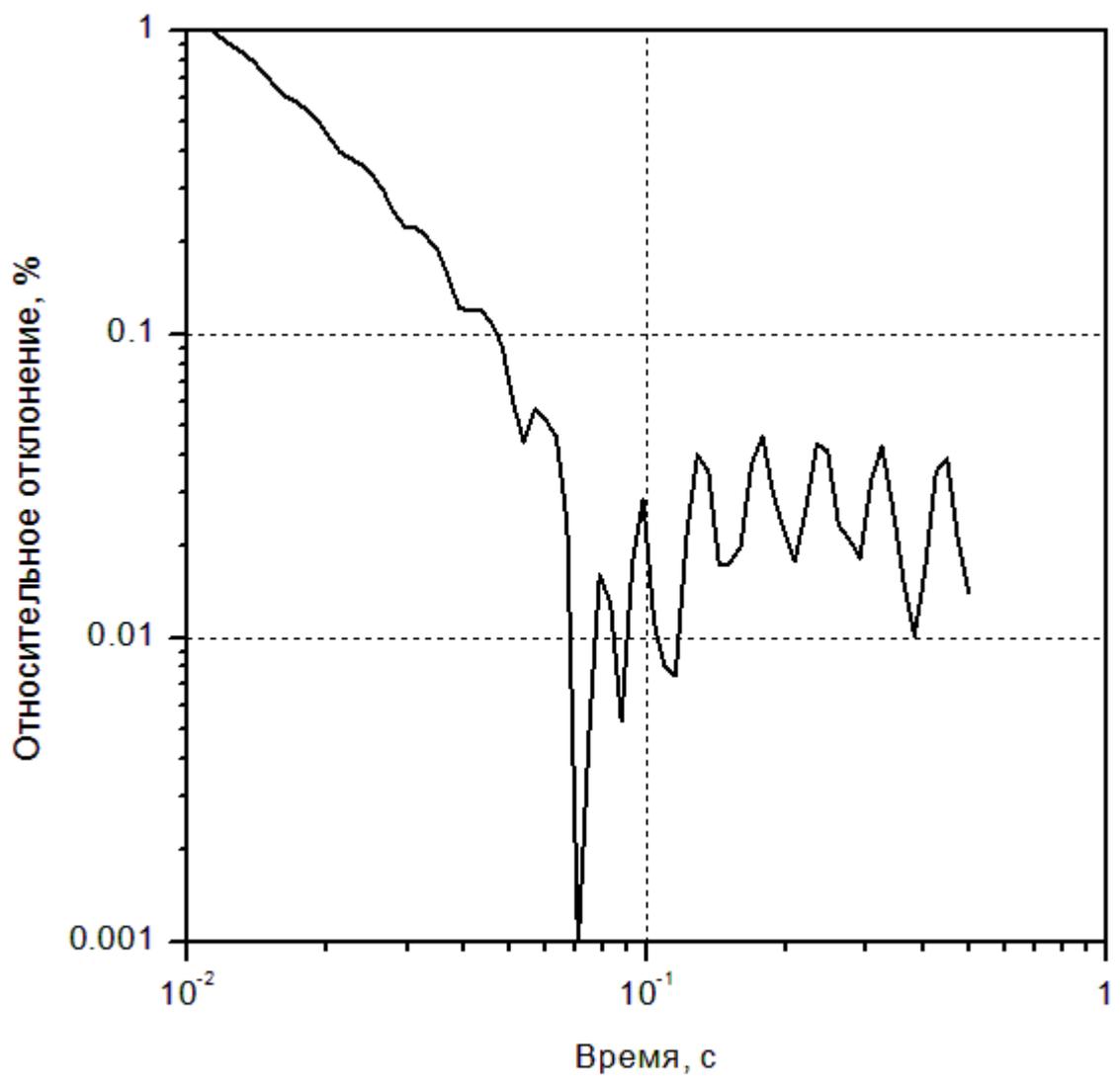


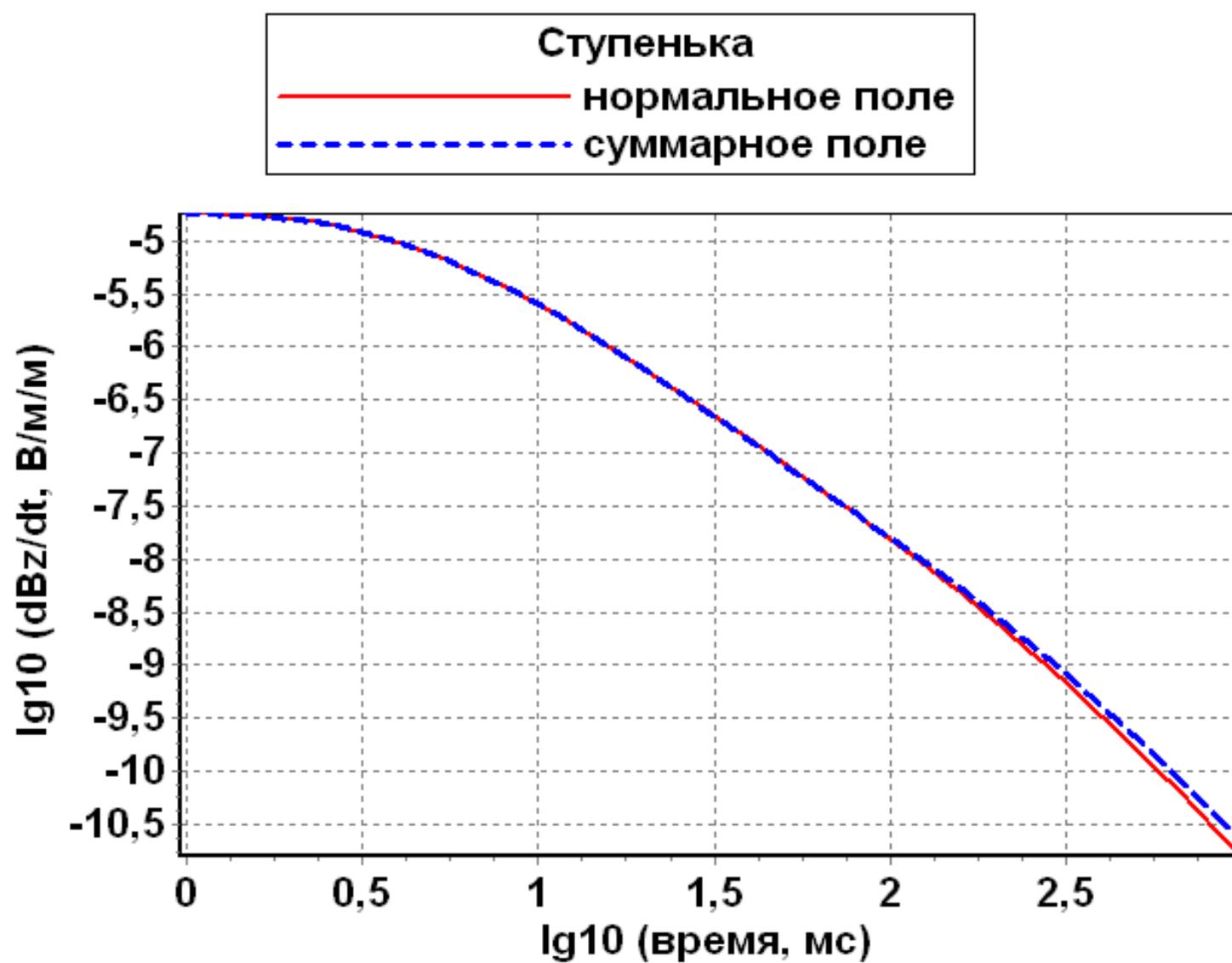


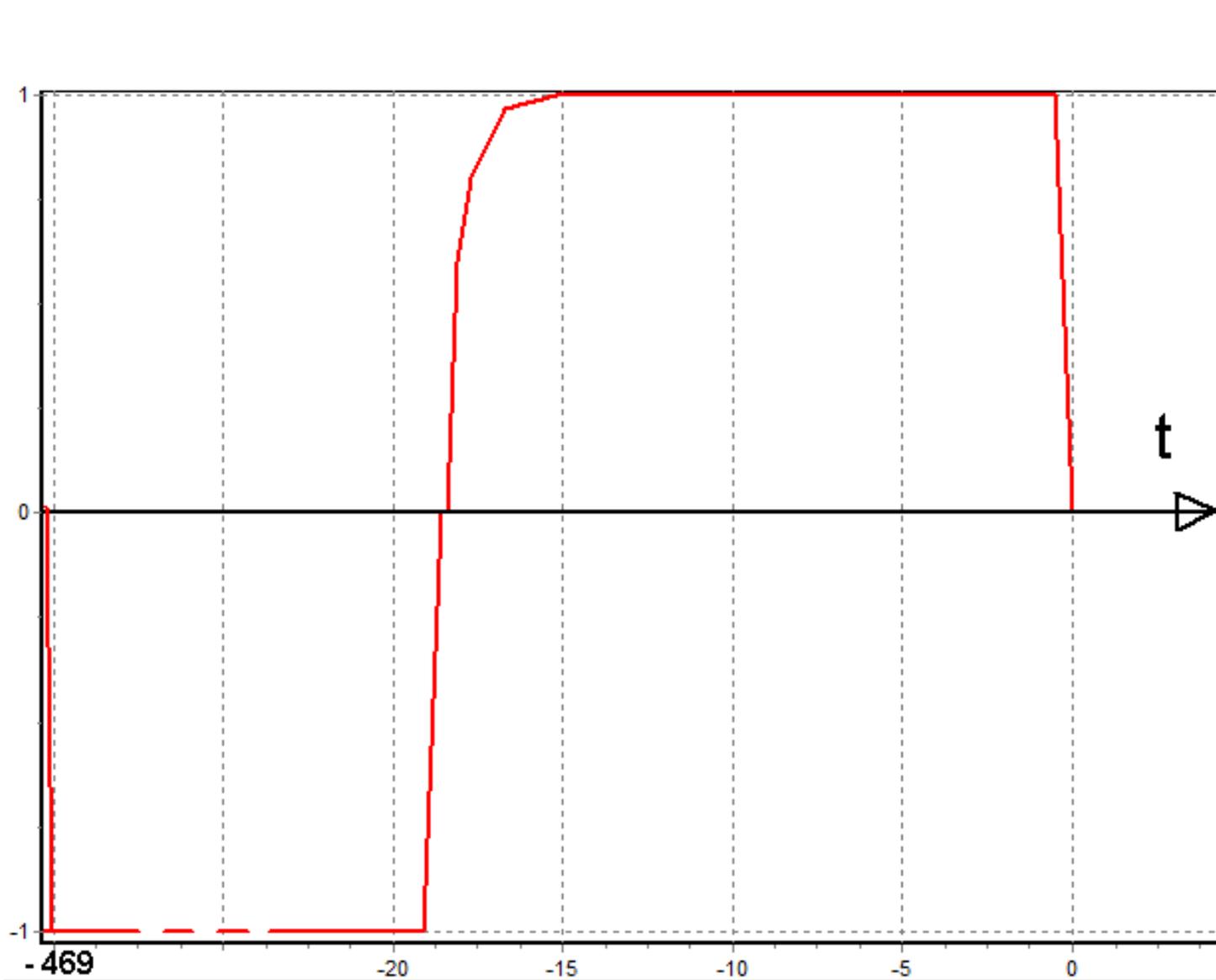






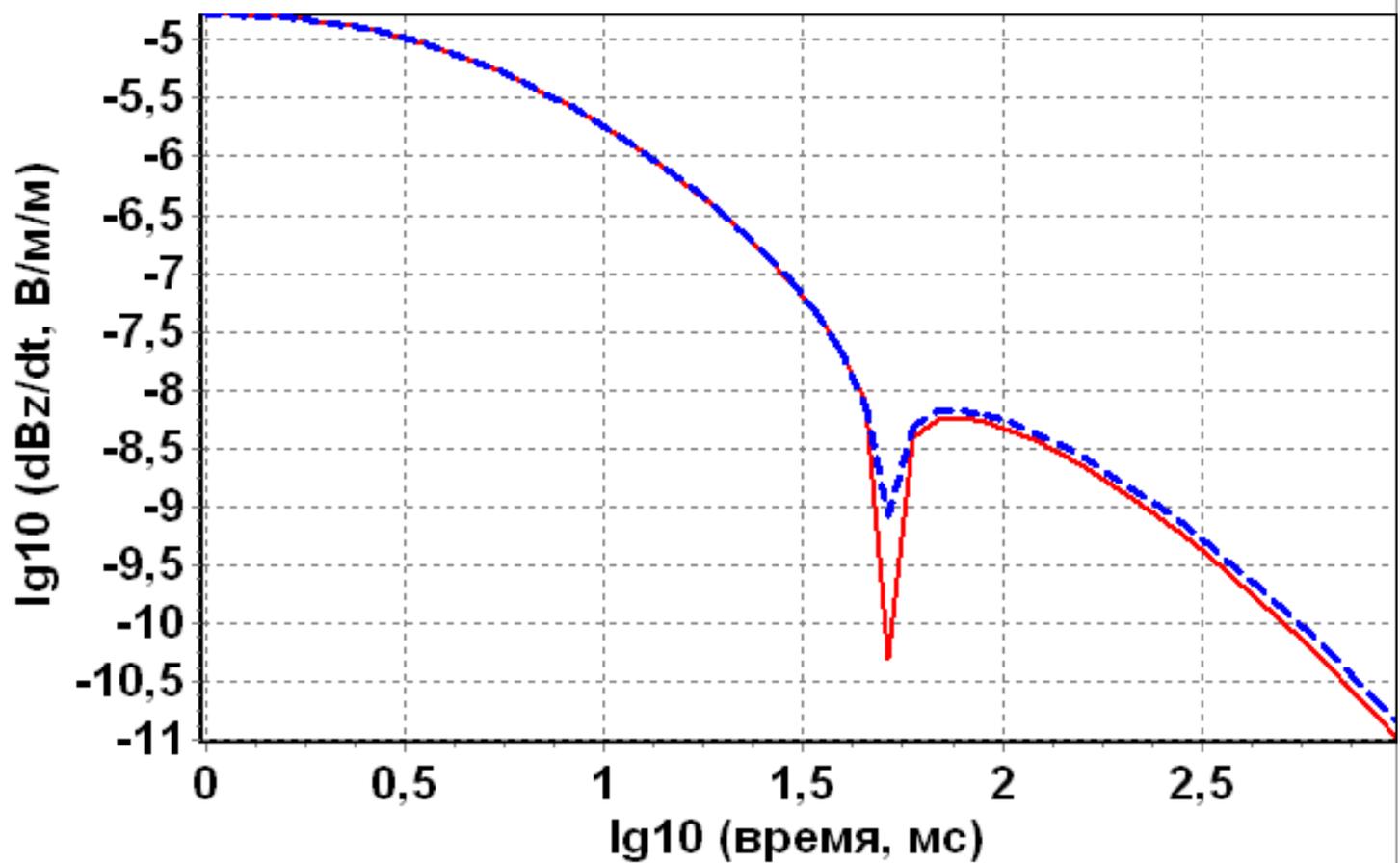


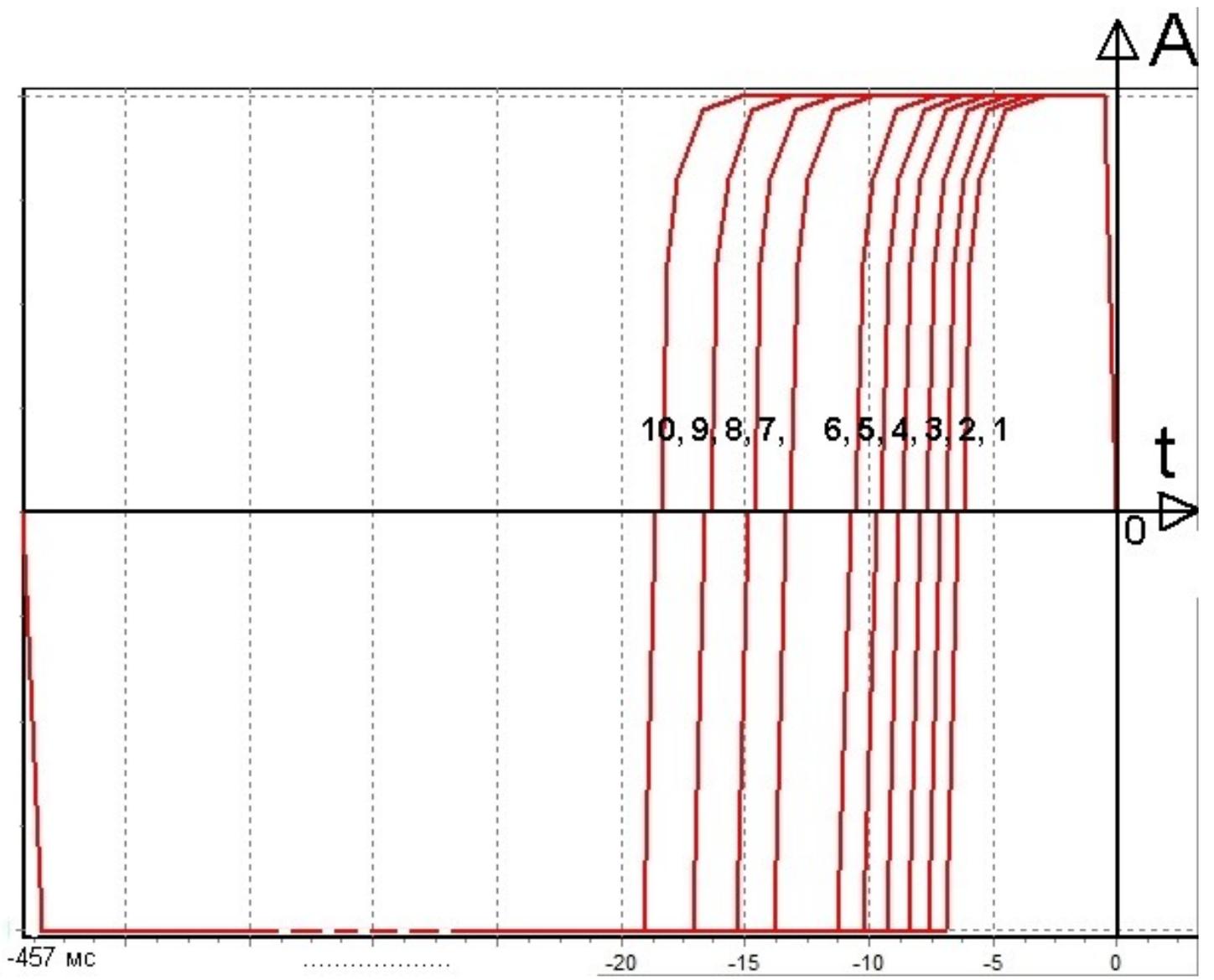




Сложный импульс (#10)

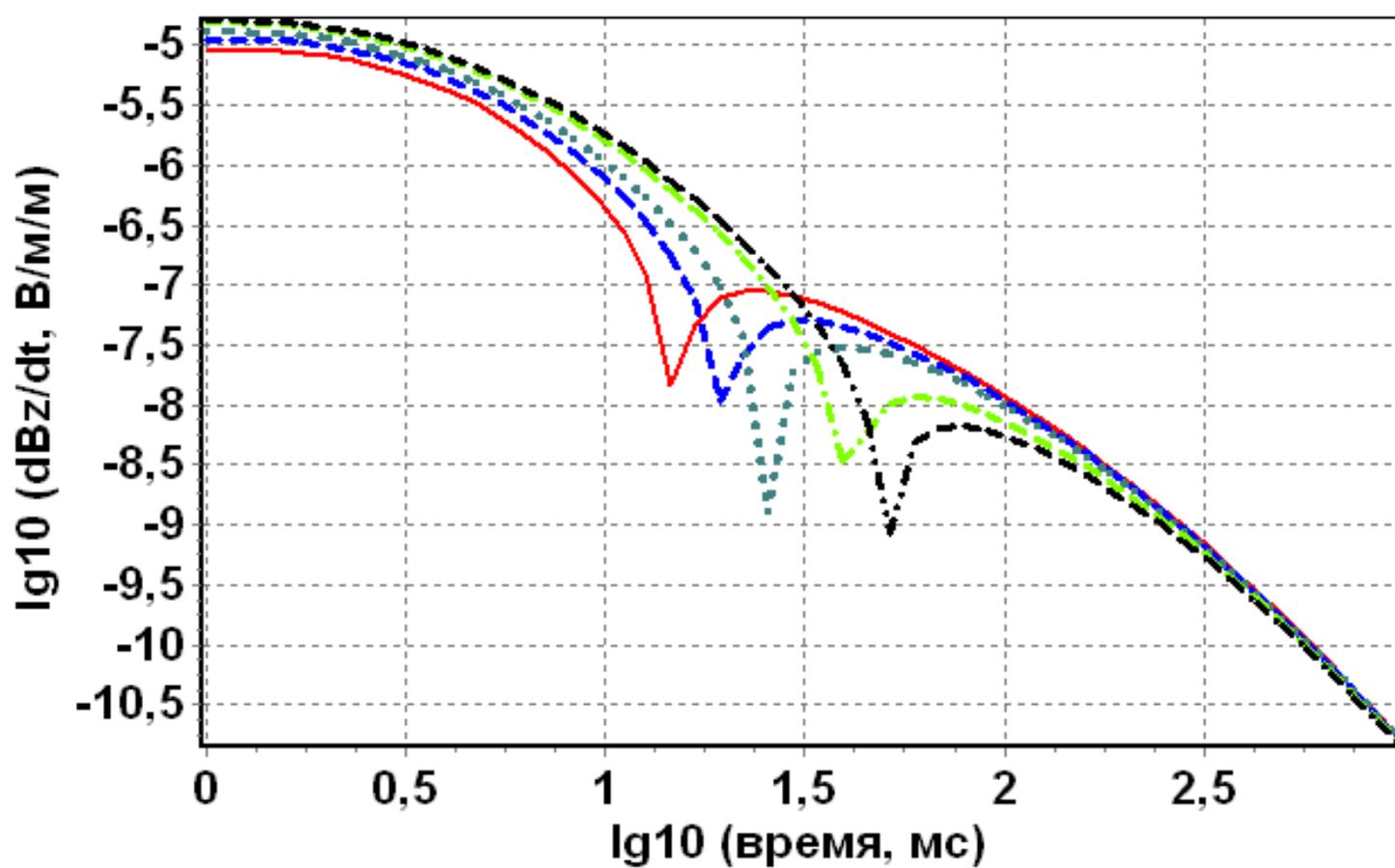
- нормальное поле
- - - суммарное поле

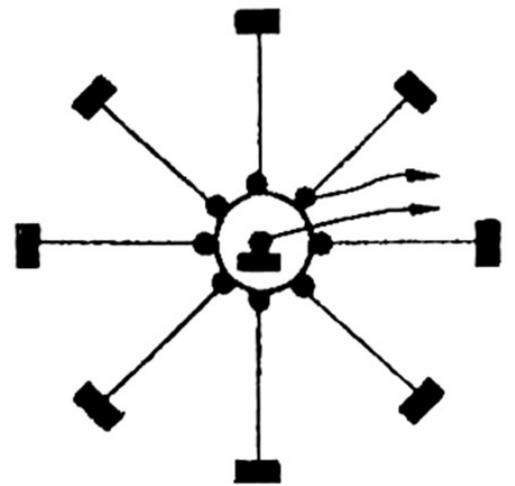
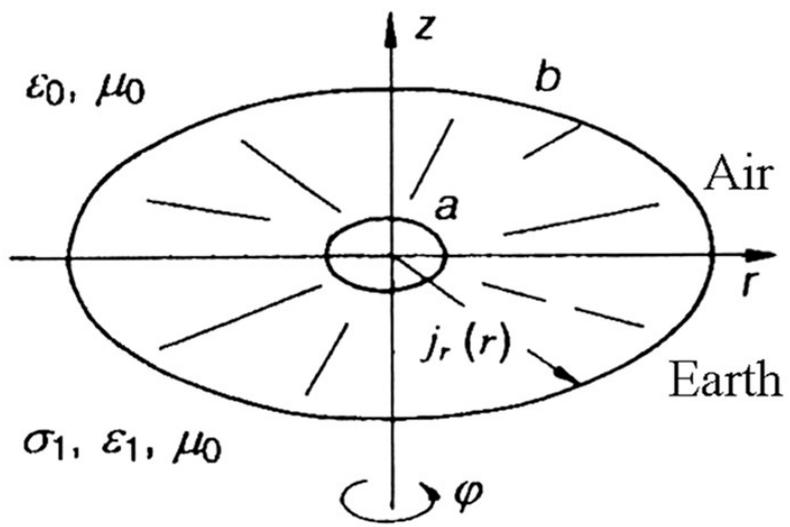


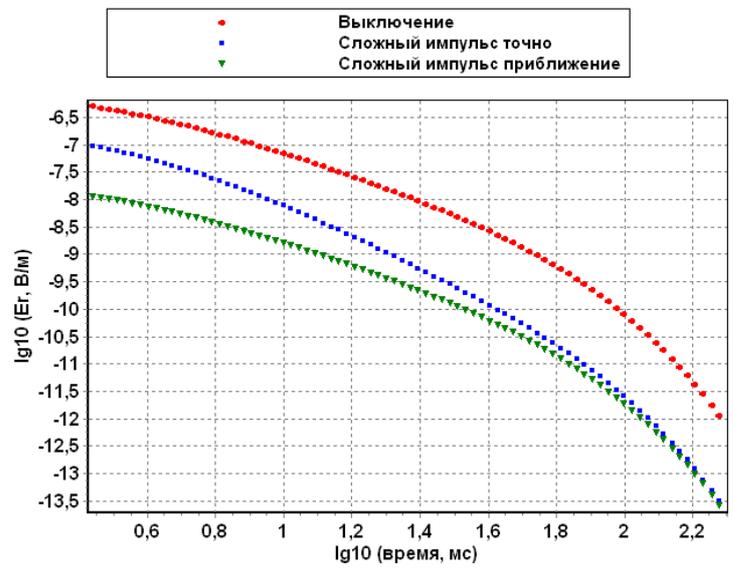
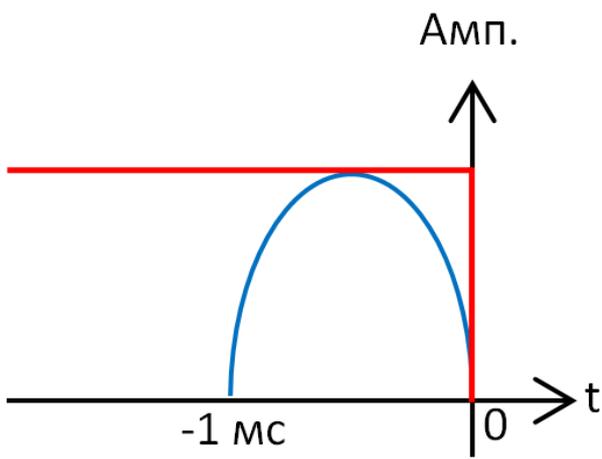


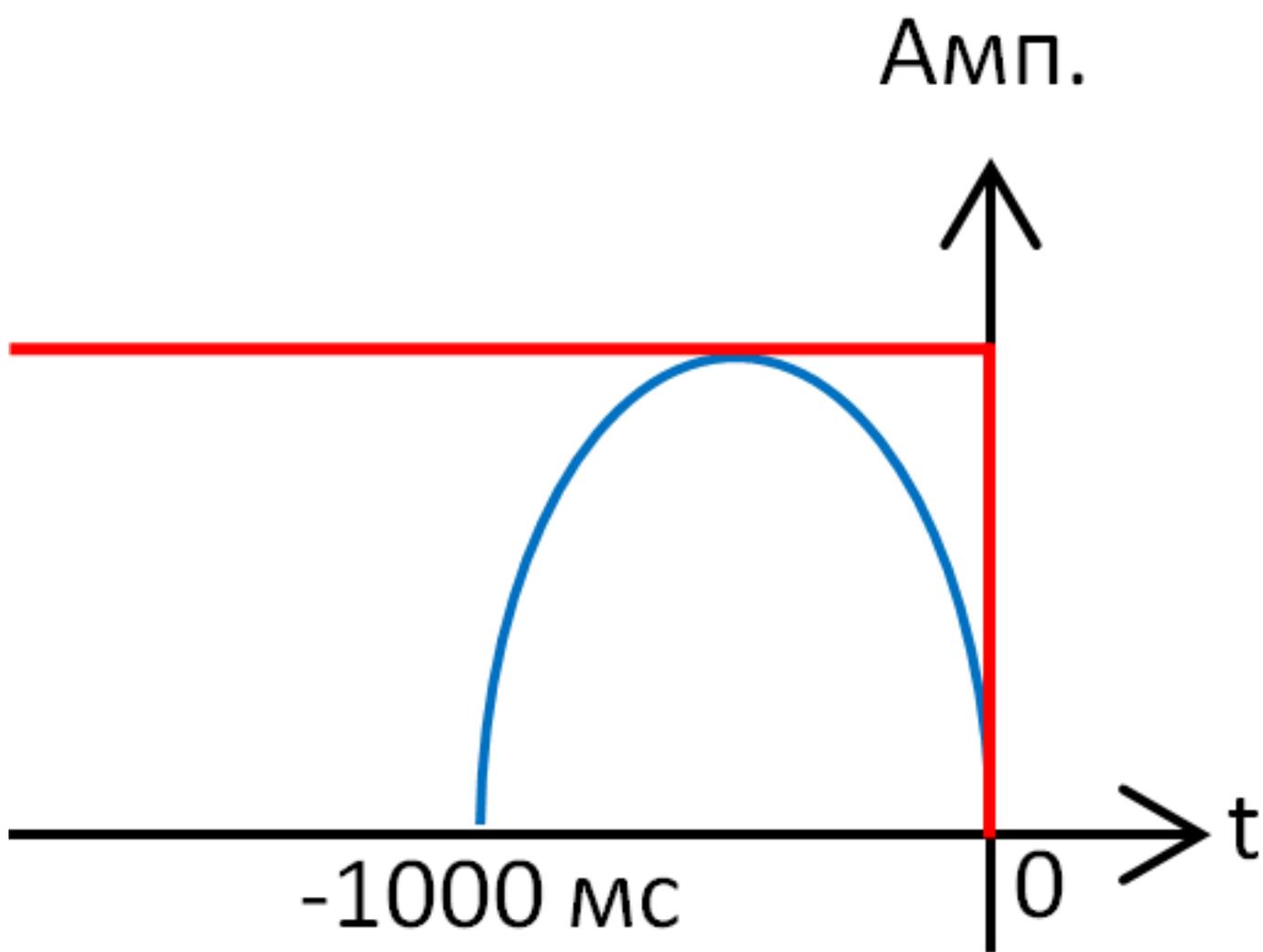
### Отклики от серии импульсов

НОМ. 1    НОМ. 3    НОМ. 5  
НОМ. 8    НОМ. 10









КЭД

$$\rho = \infty$$

$E_r$



$$\rho = 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$h = 1450 \text{ м}$$

$$\rho = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$h = 50 \text{ м}$$

$$\rho = \infty$$

