

ВОЗБУЖДЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕМ НЕФЕРРОМАГНИТНОМ ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА С РЕГЛАМЕНТИРОВАННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

В. Б. Ремезов

В работе рассмотрено возбуждение ультразвуковой волны импульсом плоского однородного электромагнитного поля регламентированной длительности в проводящем неферромагнитном полупространстве. Расчёты выполнены с учётом объёмного распределения сил. Построены графические зависимости, характеризующие распространение ультразвуковой волны в зависимости от времени и глубины.

Целью данной работы является исследование величины смещения малой единицы объёма проводящего неферромагнитного полупространства под действием электромагнитного импульса конечной длительности. В работе рассматривается величина смещения частиц материала под воздействием пондеромоторных сил. В большинстве работ, посвящённых рассмотрению подобных вопросов, например [1,3], индуцированный ток считается распределённым в тонком, по сравнению с длиной ультразвуковой (УЗК) волны, поверхностном слое металла, и силы, действующие по объёму, приводятся к поверхностным. Для большинства случаев, когда акустические колебания возбуждаются гармоническим электромагнитным полем сравнительно высокой частоты (единицы мегагерц) в материалах с высокой проводимостью, (ферромагнитные сплавы, алюминий, медь), такое допущение вполне приемлемо. Однако, при воздействии на проводящее полупространство единичного импульса картина совершенно иная, т. к. импульс имеет достаточно широкий спектр колебаний. В работе [2] подобная задача решена для импульса, длительность которого стремится к нулю. В данной работе величина задаётся, и смещение рассчитано для ряда импульсов конечной величины. Все математические расчёты и построение графических зависимостей выполнялись сквозным методом в среде "Mathcad 8", с использованием методических указаний [4], что исключает возможность случайных погрешностей и неточностей. Этим объясняется некоторая непривычность обозначений. Подготовка текстовых комментариев также выполнена с помощью текстового редактора "Mathcad 8". Все расчёты доведены до численных результатов для материала с конкретными электрофизическими параметрами.

Для проверки правильности исходных предпосылок и формул сначала были построены графические зависимости величины смещения от времени по аналогии с [2] для импульса, длительность которого стремится к нулю. Такой график, показывающий зависимость величины смещения от толщины на глубине 150 микрон для материала, электрофизические параметры которого приведены ниже, при воздействии электромагнитного импульса бесконечно малой длительности и определённой ниже величины амплитуды, приведены на рис. 1.

Выбран материал со следующими параметрами:

-скорость распространения акустических волн:

$$c := 3 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{m}}{\text{sec}}$$

-удельная электрическая проводимость:

$$\sigma := 10 \cdot 10^6 \cdot \frac{\text{S}}{\text{m}}$$

-удельный вес:

$$\rho := 7 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

В приведённых ниже формулах используются следующие обозначения:

$$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

-магнитная проницаемость вакуума;

$$H_0 := 10^5 \cdot \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

-амплитуда напряжённости магнитного поля импульса бесконечно малой длительности, воздействующего на проводящее полупространство;

$$H := 10^6 \cdot \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

-амплитуда напряжённости внешнего магнитного поля;

$$\tau_0 := 10^{-7} \cdot \text{sec}$$

-условная величина длительности импульса, введена искусственно для оценки величины смещения;

$$\Pi := H_0 \cdot \tau_0 \quad T = c^2 \cdot \mu_0 \cdot \sigma \cdot t \quad Z = c \cdot \mu_0 \cdot \sigma \cdot z$$

-обозначения по аналогии с [2];

$$T := 0, .001, 10$$

-диапазон изменения обобщённого параметра времени, соответствует изменению реального времени от 0 до 100нсек;

$$Z := 5$$

-величина обобщённого параметра глубины, соответствует реальной глубине 150мкм.

Величина смещения для единицы объёма проводящего полупространства [2]:

$$U = \frac{\mu_0 \cdot H \cdot \Pi}{\rho \cdot c} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \left(e^{T-Z} \cdot \text{erfc} \left(\frac{Z}{2 \cdot \sqrt{T}} - \sqrt{T} \right) - e^{T+Z} \cdot \text{erfc} \left(\frac{Z}{2 \cdot \sqrt{T}} + \sqrt{T} \right) \right) + (1 - e^{T-Z}) \cdot \Phi(T-Z) \right]$$

Т.к. представляют интерес зависимости от времени и расстояния, по аналогии с [2],

$$U(T) = \frac{U \cdot \rho \cdot c}{\mu_0 \cdot H \cdot \Pi}$$

представим формулу для относительной величины смещения:

$$U(T) := \left[\frac{1}{2} \left(e^{T-Z} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{Z}{2\sqrt{T}} - \sqrt{T} \right) - e^{T+Z} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{Z}{2\sqrt{T}} + \sqrt{T} \right) \right) + (1 - e^{T-Z}) \cdot \Phi(T-Z) \right]$$

Отметим, что во всех последующих формулах для расчёта величины смещения (1,2,3,4) также приведена его относительная величина. Графическая зависимость относительной величины смещения от времени для глубины 150 мкм приведена на рис.1. Как видно из рисунка, гребень акустической волны достигает максимума через расчётное время, соответствующее распространению волны на заданное расстояние. В то же время смещение частиц вещества начинается значительно раньше. Это объясняется воздействием электромагнитного поля, которое распространяется значительно быстрее УЗК волны. Результаты полностью согласуются с аналогичными графическими зависимостями, представленными в [2].

Теперь изменим начальные условия и предположим, что длительность импульса конечна и её обобщённый параметр равен:

$$\tau_i := .5$$

Т.к. в дальнейшем придётся пользоваться приведёнными выше и использованными в [2] обобщёнными параметрами, величина обобщённого параметра длительности импульса подсчитывается как:

$$\tau_i = c^2 \cdot \mu_0 \cdot \sigma \cdot t_i$$

Где “t” с индексом “i” фактическая длительность импульса.

Импульс прямоугольной формы и регламентированной длительности задаётся с помощью функции Хевисайда ([4], стр 287.), форма импульса, построенного (как и все последующие графики) с помощью графического пакета "Mathcad 8" [4] приведена на рис.2.

$$\operatorname{pulse}(T, \tau_i) := \Phi(T) - \Phi(T - \tau_i)$$

$$P_L = \frac{H_0}{s} \cdot (1 - e^{-\tau_i \cdot s})$$

Изображение по Лапласу прямоугольного импульса:

Используя выражение из [2] для изображения по Лапласу смещения частицы объёма проводящего неферромагнитного полупространства и, подставив в него Лапласово изображение прямоугольного импульса, получим в операторной форме следующую формулу для смещения при воздействии прямоугольного импульса электромагнитного поля конечной длительности:

$$U_L = \frac{H_0}{s} \cdot \left[(1 - e^{-\tau_i s}) \cdot \frac{\mu_0 H}{\rho \cdot s \cdot (s - c^2 \cdot \mu_0 \sigma)} \right] \cdot \left(\sqrt{\mu_0 \sigma \cdot s} \cdot e^{-z \cdot \sqrt{\mu_0 \sigma \cdot s}} - c \cdot \mu_0 \sigma \cdot e^{-s \cdot \frac{z}{c}} \right)$$

где "s" - переменная преобразования Лапласа.

По таблицам соответствий [5] и используя теорему о свёртке функций можно получить оригинал смещения. Для удобства представления в среде Mathcad окончательное выражение для смещения разбито на три части (1,2,3), и затем представлена сумма (4).

В нижеприведённых формулах:

-T - задаёт временной интервал, в котором исследуется смещение единицы объёма вещества, в данном случае от 10 до 100 нсек;

- Z - задаёт расстояние от поверхности материала - глубину на которой проводится исследование, на рисунках 3 и 4 соответственно 60 мкм и 150 мкм;

-тау с индексом "i" задаёт длительность импульса, в данном случае 5 нсек, 10 нсек, 20 нсек и 30 нсек.

$$T := 1..10 \quad Z := 2 \quad \tau_i := .5$$

На рисунках 3 и 4 по оси абсцисс отложено время, глубина выбирается фиксированной, а на рисунках 5,6,7 по оси абсцисс откладывается глубина, а время, измеряемое от начала воздействия импульса до момента фиксации принимается определённой постоянной величиной. По оси ординат на всех графиках отложена величина смещения, вычисленная непосредственно в нанометрах. Представленные зависимости позволяют судить о распространении УЗК волны в поверхностном слое материала с учётом объёмного распределения сил при воздействии кратковременного импульса.

Формула (1):

$$Up5_{0T} := \frac{1}{2} \cdot \left[\int_0^T e^{\tau - Z} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{Z}{2 \cdot \sqrt{\tau}} - \sqrt{\tau} \right) \cdot \operatorname{pulse}(T - \tau, \tau_i) d\tau \right]$$

Формула (2):

$$Up5_{1T} := \frac{1}{2} \cdot \left[\int_0^T \left(e^{\tau + Z} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{Z}{2 \cdot \sqrt{\tau}} + \sqrt{\tau} \right) \right) \cdot \operatorname{pulse}(T - \tau, \tau_i) d\tau \right]$$

Формула (3):

$$U_{p5_2_T} := \int_0^T (1 - e^{\tau - Z}) \cdot \Phi(\tau - Z) \cdot \text{pulse}(T - \tau, \tau; j) d\tau$$

Формула (4):

$$U_{p5_T} := U_{p5_0_T} - U_{p5_1_T} + U_{p5_2_T}$$

Анализируя графические зависимости, представленные на рисунках 3 и 4, можно сказать, что амплитуда смещения пропорционально увеличивается с увеличением длительности импульса, воздействующего на проводящее полупространство электромагнитного поля. Кроме того, видно, что пространственные изменения в веществе начинаются раньше, чем туда доходит ультразвуковая волна, это объясняется воздействием электромагнитного поля, скорость распространения которого значительно выше. Максимум смещения получается для данной конкретной глубины через промежуток времени, равный времени прохождения УЗК импульса на данную глубину плюс длительность импульса.

На рис. 5,6,7 представлены графические зависимости, иллюстрирующие распределение смещения по глубине через фиксированный промежуток времени, при воздействии импульса заданной длительности.

Из графических зависимостей, приведённых на рис. 6,7 видно, что при увеличении длительности импульса возбуждения, максимум смещения передвигается в область меньшей глубины. Это объясняется более сильным эффектом воздействия электромагнитного поля, которое снижается с увеличением глубины.

Анализируя смещение единицы объёма вещества в поверхностном слое проводящего полупространства, при воздействии на него кратковременного электромагнитного импульса, можно сделать следующие выводы:

1. Величина смещения пропорционально увеличивается с увеличением длительности импульса.
2. В конкретной точке вещества, на определённой глубине, смещение начинает происходить раньше, чем туда успевает пройти УЗК волна.
3. Максимальная величина смещения в конкретной точке вещества, на определённой глубине, получается через следующий отрезок времени, отсчитываемый от начала воздействия импульса: время прохождения импульса до данной точки плюс длительность импульса.
4. При увеличении длительности импульса возбуждения максимум смещения передвигается в область меньшей глубины.

5. Все эффекты, перечисленные в пунктах 1...4 вызваны учётом объёмного распределения сил в поверхностном слое материала. Приведение объёмных сил к поверхностным может дать значительную погрешность, особенно заметную при контроле материалов с низкой электропроводностью.

ЗАО "НИИИИИ МНПО "Спектр"

Поступила в редакцию

28.03.02

ЛИТЕРАТУРА

1. Сазонов Ю. И., Шкарлет Ю. М.. Исследование бесконтактных методов возбуждения и регистрации ультразвуковых колебаний. — Дефектоскопия, 1969, N5, с.1.
2. А. И. Бутенко, Ю. Н. Рускевич, Ю. М. Шкарлет. Исследование акустического поля в металлическом полупространстве при импульсном электромагнитном возбуждении. — Дефектоскопия, 1971, N2, с. 83.
3. В. А. Комаров, Н. П. Зверев, В. П. Ломаева. Закономерности ЭМА - трансформации объёмных волн, возбуждаемых в металлах накладными преобразователями. — Дефектоскопия, 1987, N10 с.73-81.
4. Mathcad. Руководство пользователя. — М: ИИД "Филинь", 1997.
5. Диткин В.А., Прудников А.П. Справочник по операционному исчислению.— М: Высшая школа, 1965.
6. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. — М.: Наука, 1965.

ПЕРЕЧЕНЬ ПОДРИСУНОЧНЫХ ПОДПИСЕЙ

1. Рис. 1. Распространение акустической волны в проводящем полупространстве при воздействии электромагнитного импульса бесконечно малой длительности.
2. Рис. 2. Форма импульса регламентированной длительности напряжённости магнитного поля, воздействующего на проводящее полупространство. На данном рисунке длительность импульса 5нсек.
3. Рис. 3. Графически изображена величина смещения на глубине 60мкм при воздействии на проводящее полупространство прямоугольного импульса электромагнитного поля конечной длительности. U_{p5} - длительность импульса 5нсек, $U1$ - длительность импульса 10нсек, $U2$ - длительность импульса 20нсек, $U3$ - длительность импульса 30нсек.
4. На рис.4 графически изображена величина смещения на глубине 150мкм при воздействии на проводящее полупространство прямоугольного импульса электромагнитного поля конечной длительности. U_{p5} - длительность импульса 5нсек, $U1$ - длительность импульса 10нсек, $U2$ - длительность импульса 20нсек, $U3$ - длительность импульса 30нсек.
5. На рис.5 графически представлено распределение смещения по глубине через 20нсек после начала воздействия на проводящее полупространство прямоугольного импульса электромагнитного поля конечной длительности 20нсек. U_{p5} - длительность импульса 5нсек, $U1$ - длительность импульса 10нсек, $U2$ - длительность импульса 20нсек, $U3$ - длительность импульса 30нсек. Третья и четвёртая кривая (соответствующие 20нсек и 30нсек) сливаются, что вполне объяснимо, т. к. процесс рассматривается по прошествии всего 20нсек.
6. На рис.6 графически представлено распределение смещения по глубине через 50нсек после начала воздействия на проводящее полупространство прямоугольного импульса электромагнитного поля конечной длительности. U_{p5} - длительность импульса 5нсек, $U1$ - длительность импульса 10нсек, $U2$ - длительность импульса 20нсек, $U3$ - длительность импульса 30нсек.
7. На рис.7 графически представлено распределение смещения по глубине через 70нсек после начала воздействия на проводящее полупространство прямоугольного импульса электромагнитного поля конечной длительности. U_{p5} - длительность импульса 5нсек, $U1$ - длительность импульса 10нсек, $U2$ - длительность 20нсек, $U3$ - длительность импульса 30нсек.

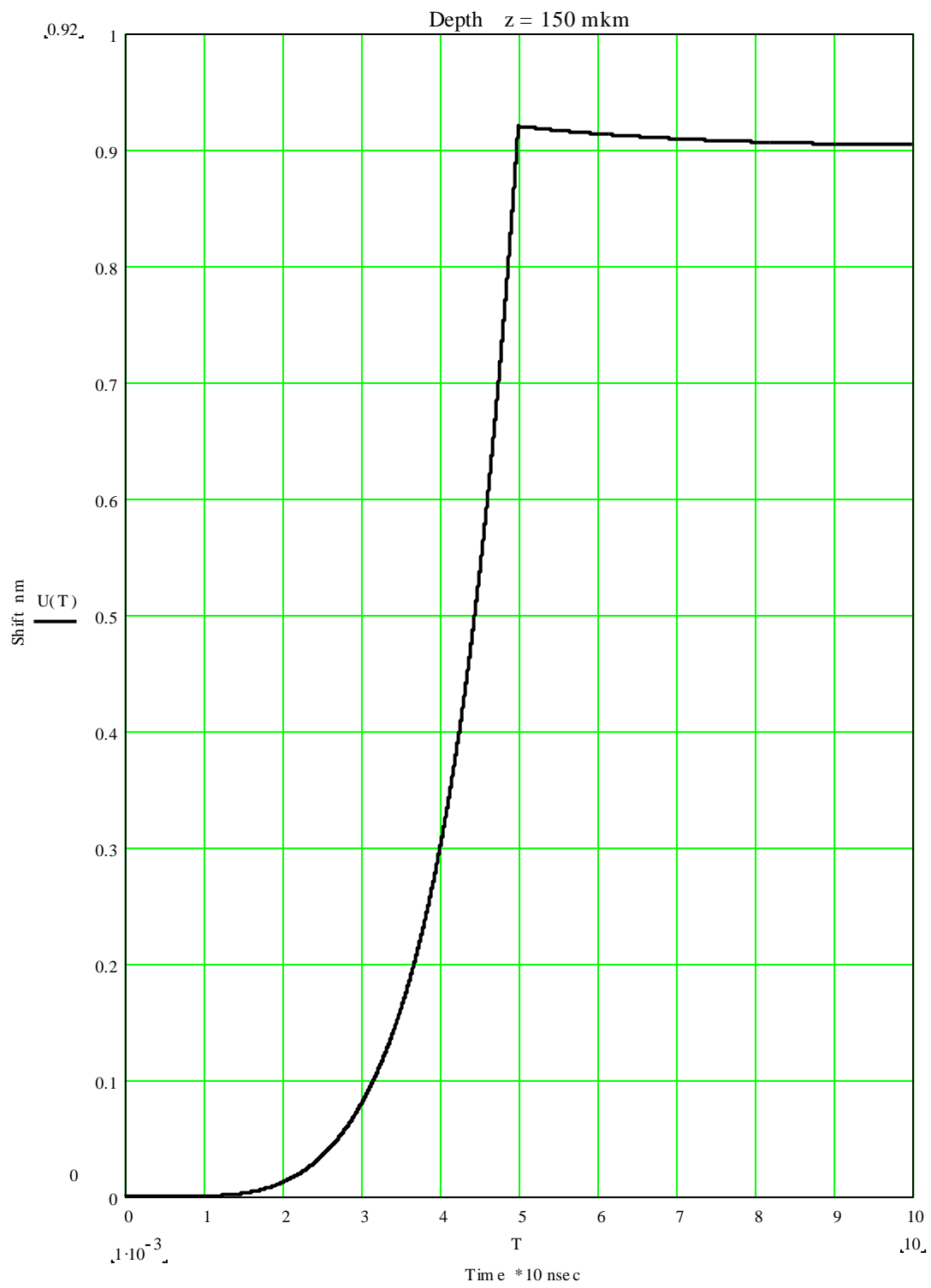


Рис.1

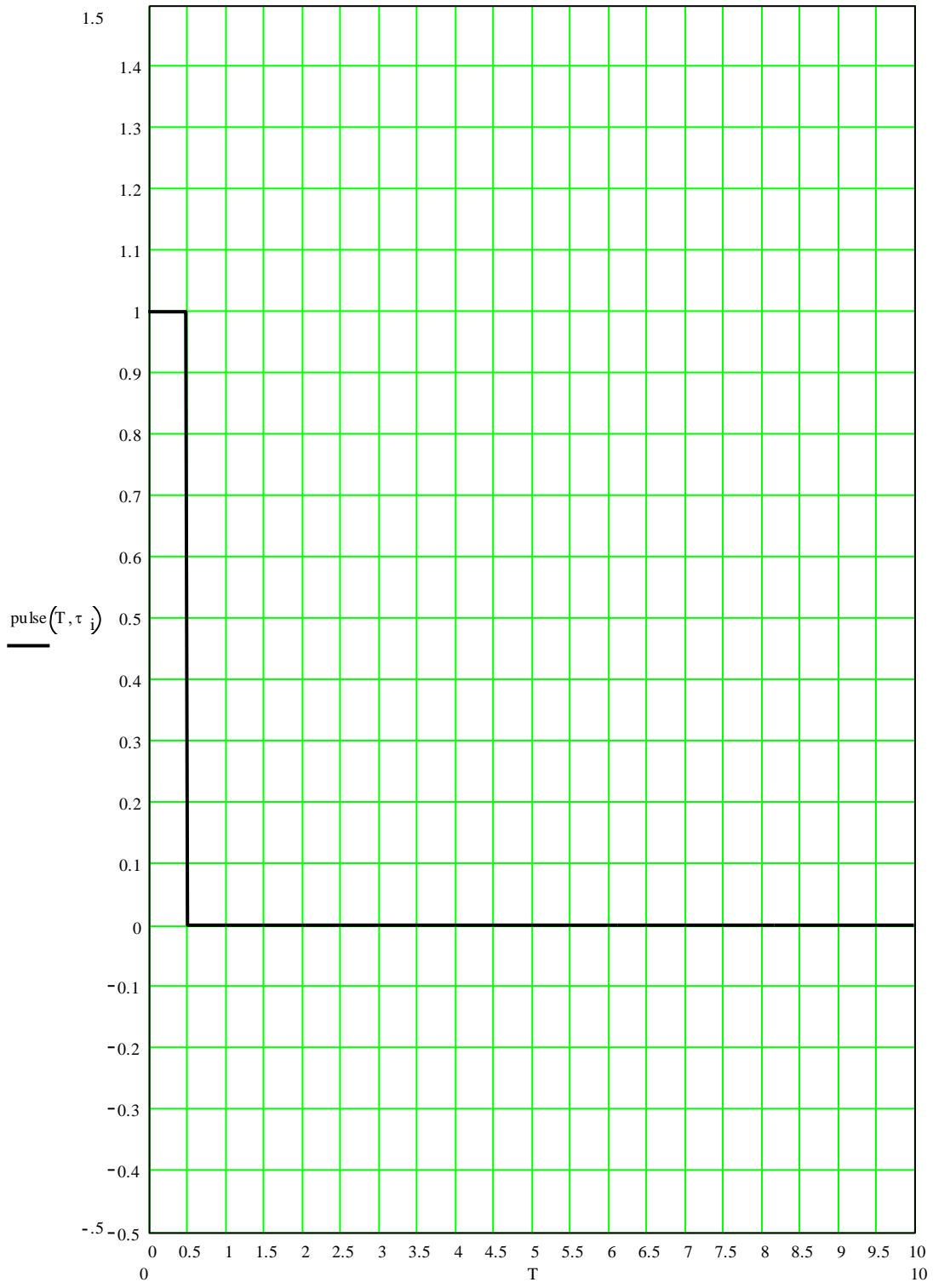


Рис. 2

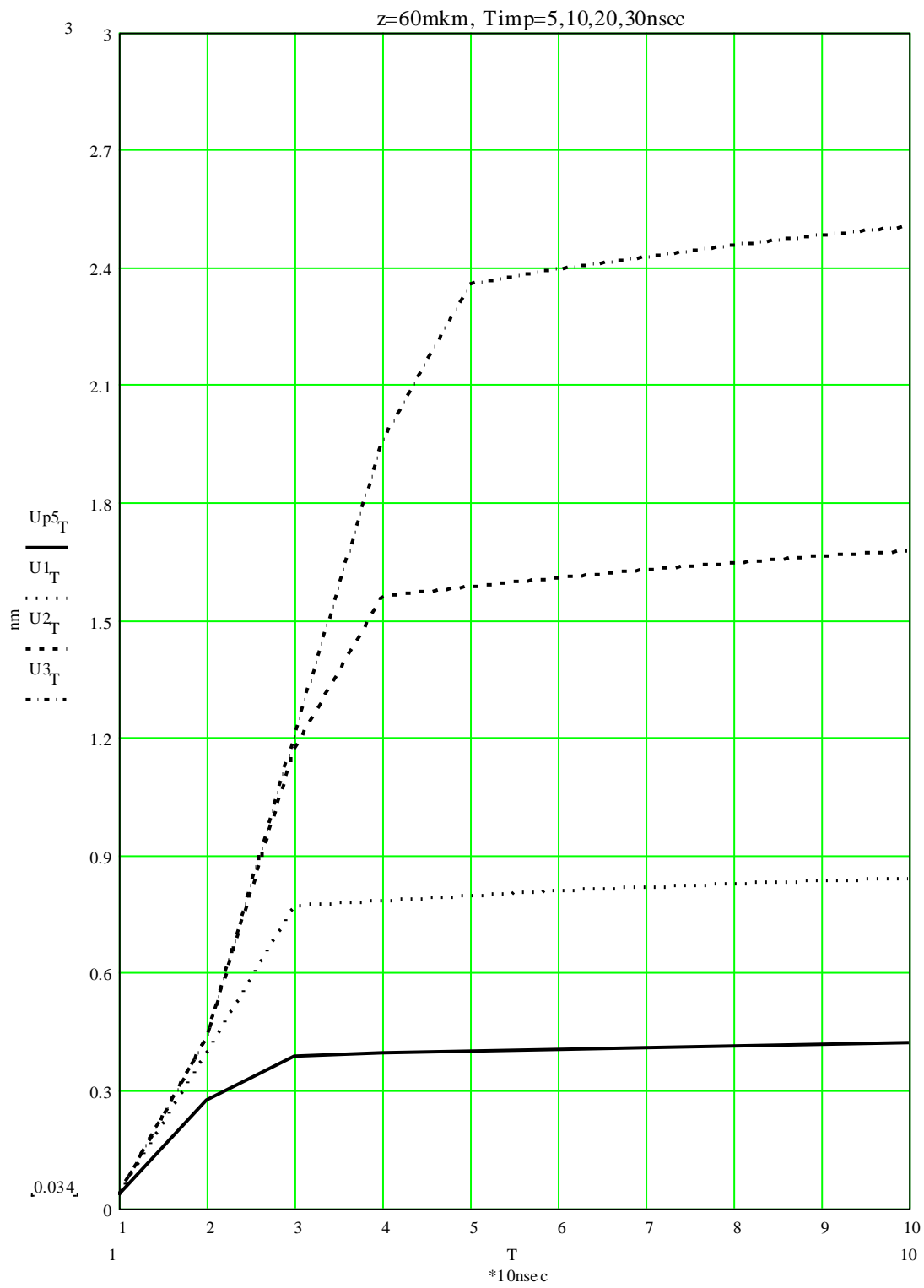


Рис. 3

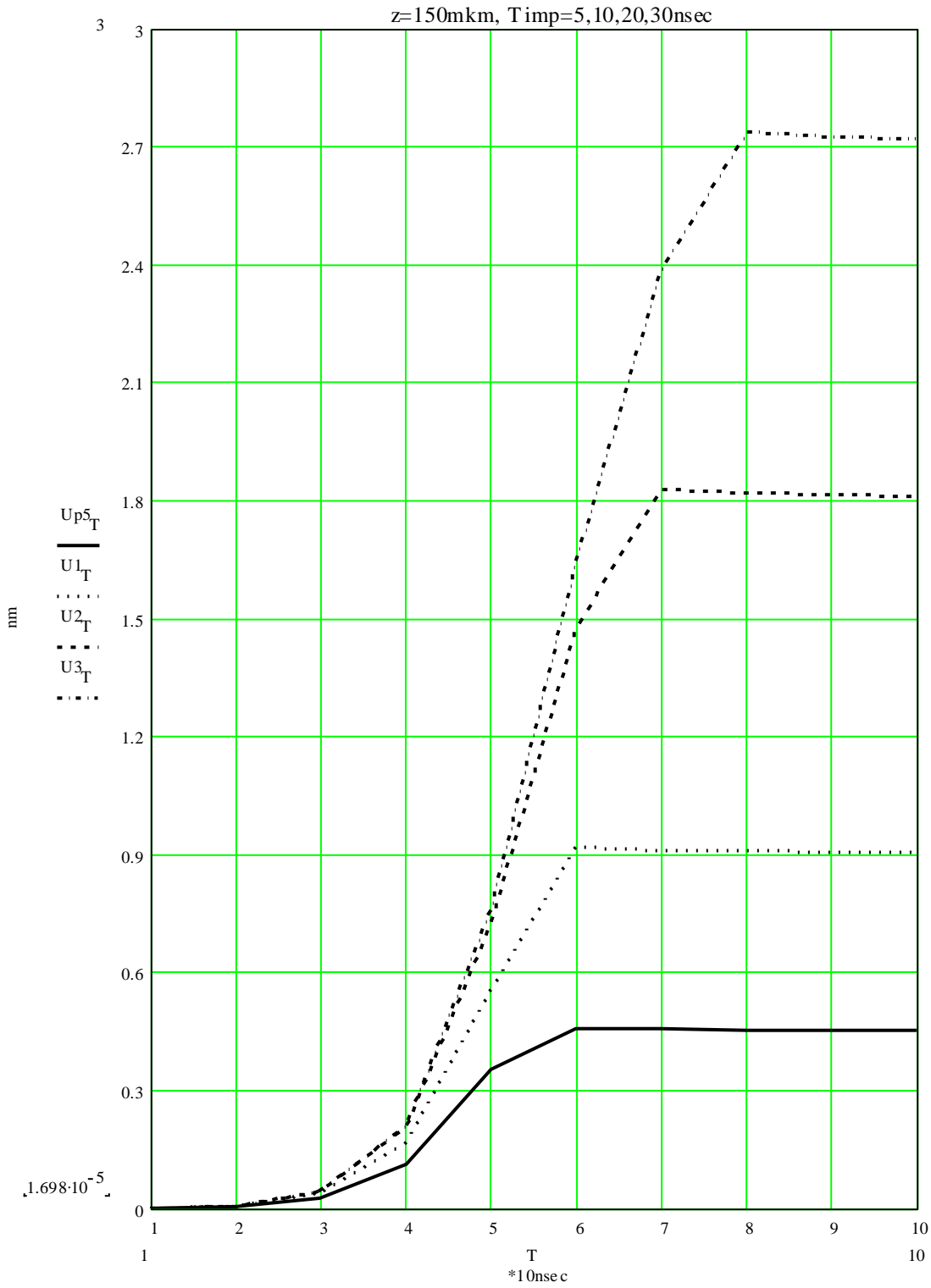


Рис. 4

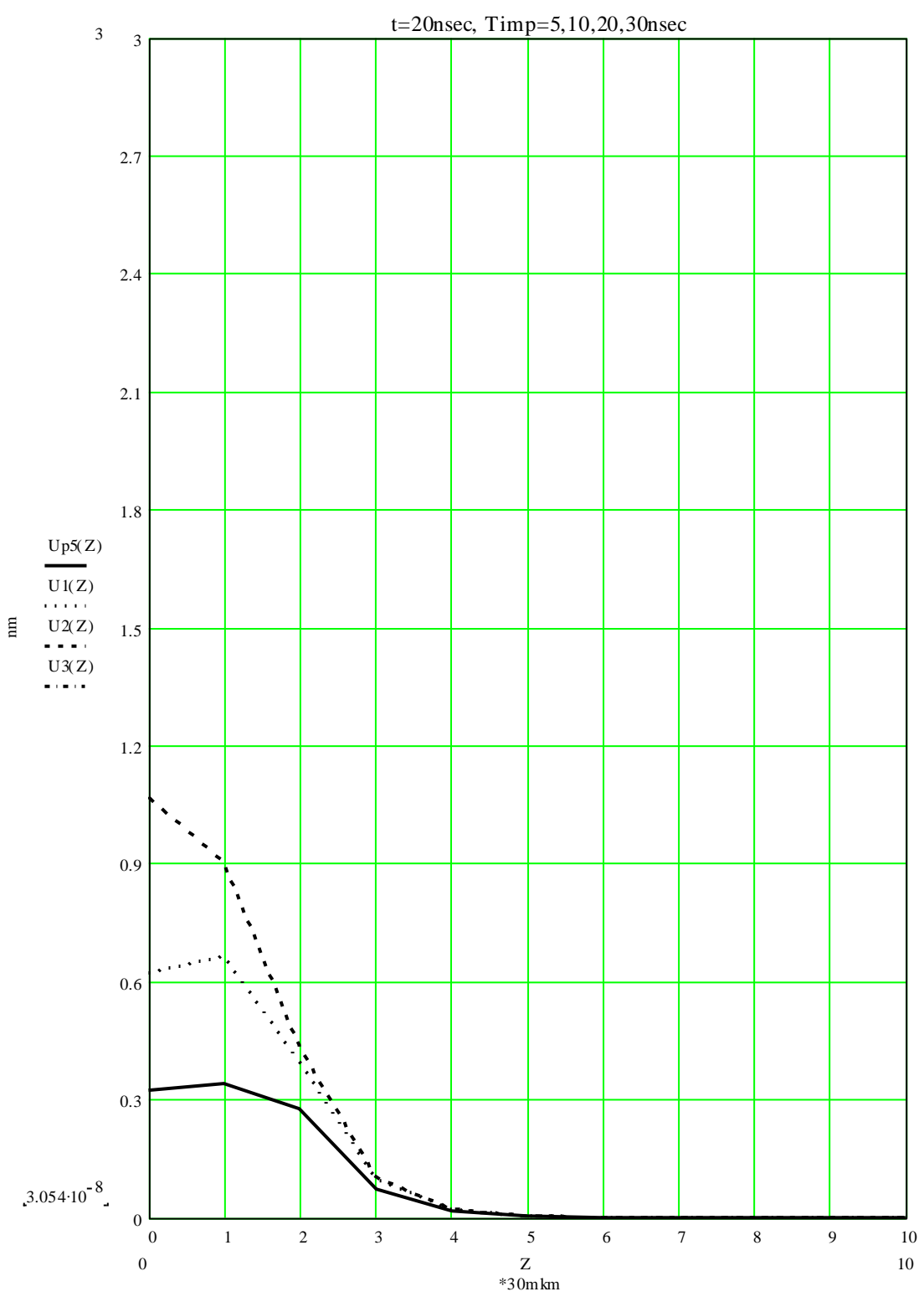


Рис. 5

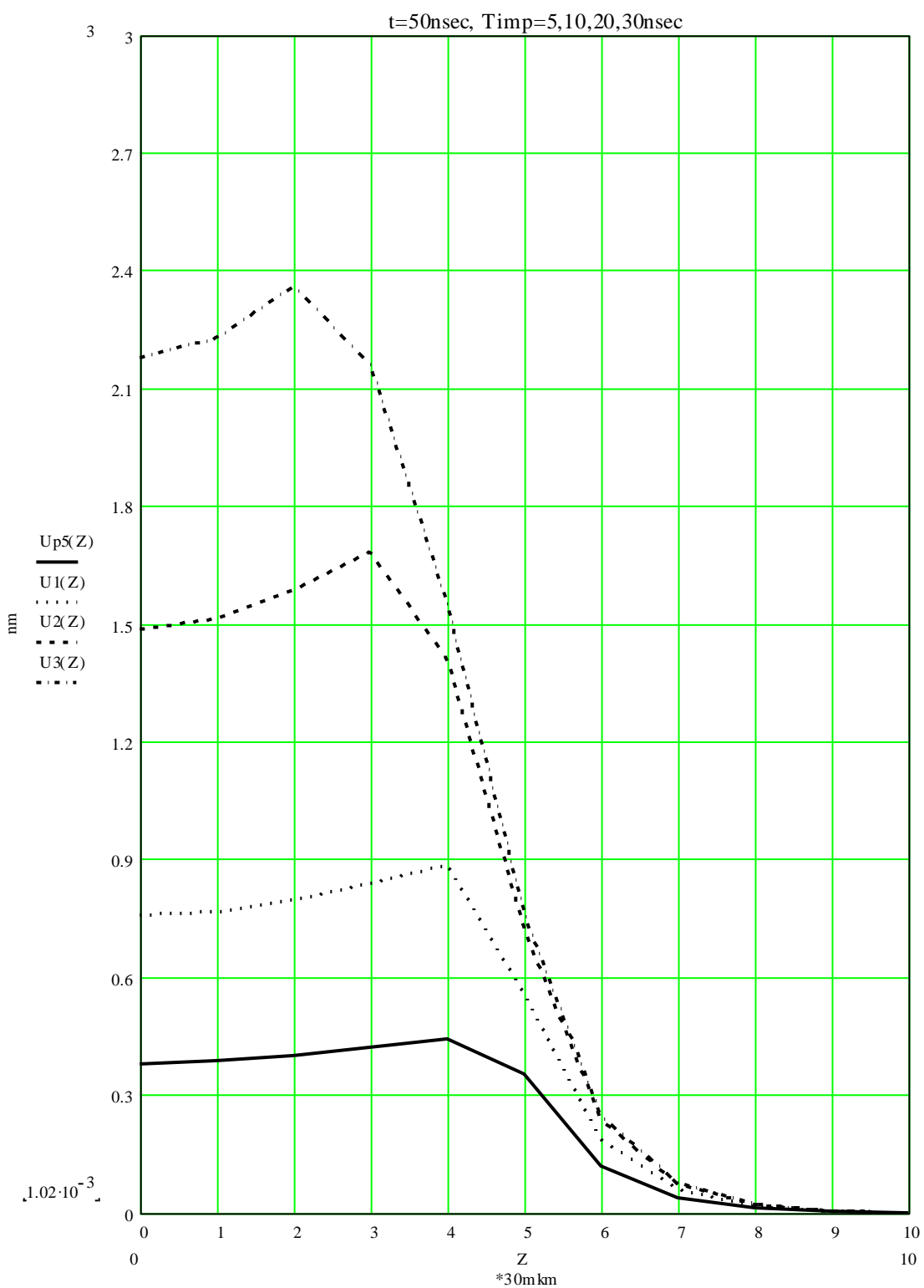


Рис. 6

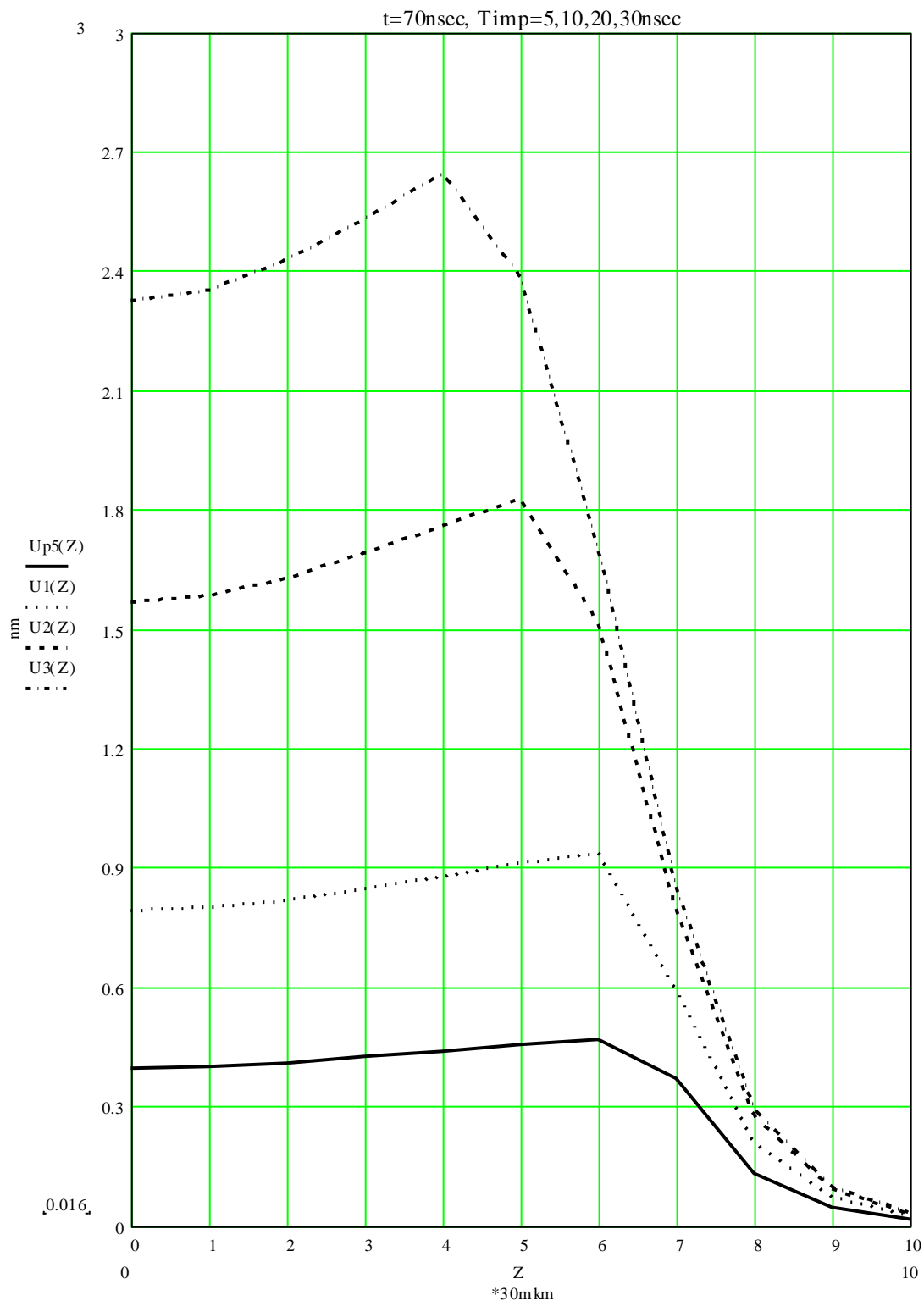


Рис. 7

АВТОРЕФЕРАТ

к статье Ремезова В. Б.

"ВОЗБУЖДЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕМ НЕФЕРРОМАГНИТНОМ ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА С РЕГЛАМЕНТИРОВАННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ"

В работе рассмотрено возбуждение ультразвуковой волны импульсом плоского однородного электромагнитного поля регламентированной длительности в проводящем неферромагнитном полупространстве. В отличие от классического рассмотрения расчёты выполнены с учётом объёмного распределения сил. Построены графические зависимости, характеризующие распространение ультразвуковой волны в зависимости от времени и глубины.