

Е. С. Хлыстун^{1,2}, И. Н. Злыгостев¹*

Генератор коротких импульсов магнитного поля для высокочастотной индуктивной электроразведки с использованием малогабаритного вертикального магнитного диполя

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

² Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск,
Российская Федерация

* e-mail: KhlystunES@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Расширение области применения метода переходных процессов в сторону малых глубин возможно путем возбуждения геологической среды короткими импульсами магнитной индукции с последующей регистрацией компонент вектора магнитной индукции с высокой частотой. В данной работе представлена система излучения коротких видеоимпульсов магнитной индукции (основная компонента - B_z), состоящая из повышающего импульсного преобразователя напряжения, мощного быстродействующего коммутатора на полевых транзисторах, схемы управления, согласующего резистора и излучателя, в виде малогабаритного вертикального магнитного диполя. Формирование зондирующих импульсов производится путем разряда конденсатора через мощный быстродействующий коммутатор на полевых транзисторах. Лабораторные испытания изготовленного прототипа системы показали возможность формирования импульсов тока с максимальной величиной от $6 \div 115$ А, длительностью от 100 до 2000 нс и временем нарастания от 10 до 200 нс. Максимальная величина компоненты магнитной индукции B_z в центре разработанного диполя составляет соответственно от $15 \div 400$ мкТл. Размер излучателя составляет 0.44×0.44 м, вес 0.9 кг, блок электронного обеспечения – $130 \times 80 \times 45$ мм, вес 0.3 кг. Потребляемая мощность – 5 Вт, напряжение питания 12.6 В постоянного тока (аккумуляторная батарея). Общий вес системы с аккумулятором емкостью 7.5 А·ч составляет 3 кг, ресурс непрерывной работы – 14 часов. Технические и конструктивные параметры разработанной системы позволяют выполнять серию зондирований МПП по заданному профилю.

Ключевые слова: генератор токовых импульсов, вертикальный магнитный диполь, субнано-секундная область, метод переходного процесса

E. S. Khlystun^{1,2}, I. N. Zlygostev¹*

Generator of short magnetic field pulses for high-frequency inductive electrical prospecting using a small-sized vertical magnetic dipole

¹ Institute of Petroleum Geology and Geophysics A. A. Trofimuk SB RAS, Novosibirsk,
Russian Federation

² Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: KhlystunES@ipgg.sbras.ru*

Abstract. The extension of the application area of the transient process method towards shallow depths is possible by excitation of the geological environment with short pulses of magnetic induction, followed by registration of the components of the magnetic induction vector with a high frequency. This paper presents a system for emitting short video pulses of magnetic induction (the main

component is B_z), consisting of a step-up pulse voltage converter, a powerful high-speed switch on field-effect transistors, a control circuit, a terminating resistor and an emitter, in the form of a small-sized vertical magnetic dipole. Probing pulses are formed by discharging a capacitor through a powerful high-speed field-effect transistor switch. Laboratory tests of the manufactured prototype of the system showed the possibility of generating current pulses with a maximum value of $6 \div 115$ A, a duration of 100 to 1800 ns and a rise time of 10 to 200 ns. The maximum value of the magnetic induction component B_z at the center of the developed dipole is, respectively, from 15 to 400 μT . The size of the emitter is 0.44 x 0.44 m, weight 0.9 kg, electronic software unit - 130 x 80 x 45 mm, weight 0.3 kg. Power consumption - 5 W, supply voltage 12.6 V DC (battery). The total weight of the system with a battery with a capacity of 7.5 Ah is 3 kg, the resource of continuous operation is 14 hours. The technical and design parameters of the developed system make it possible to perform a series of MSP soundings along a given profile.

Keywords: current pulse generator, vertical magnetic dipole, sub-nanosecond region, transient method

Введение

На данный момент главным конкурентом МПП в области малых и сверхмалых глубин являются георадиолокационные исследования, проводимые традиционными георадарами. В работе [1] проведено сравнение возможностей ОКО-2 и сверхширокополосного (СШП) георадаров в низкоомной геологической среде (20-50 Ом·м). Как показало исследование, глубина зондирования для георадара ОКО-2 с центральной частотой 150 МГц составляет порядка 2-4 м, а для СШП глубина зондирования находится в пределах 30-40 м. Также отмечается, что существенным ограничением данного метода является наличие высокого уровня помехи, вызванной прямой воздушной волной между антеннами передатчика и приемника.

Одним из широко используемых на практике индуктивных методов электроразведки является метод переходных процессов (МПП). При зондировании МПП исследуется реакция геологической среды на возбуждение импульсами магнитного поля – переходная характеристика среды.

Для анализа переходных характеристик любой системы необходимо и достаточно провести исследования изменения ее параметров во времени при внешнем возмущающем воздействии в виде функции Хэвисайда (ступенька, включение - выключение), дельта-функции (видеоимпульса малой длительности). На ранних временах переходной процесс содержит информацию о структуре электропроводности области среды, находящейся вблизи излучателя, а на поздних вдали от него [2, 3]. При импульсном возбуждении изучаемой среды минимальная глубина зондирования напрямую связана с длительностью излучаемых импульсов, которая определяет «мертвое время» всей системы: измерение отклика от возбуждаемой среды возможно только после окончания возмущающего импульса, что сразу накладывает значительные ограничения на конструкцию и размеры излучателя (магнитного диполя). Для исследования геоэлектрической структуры геологической среды на малых глубинах необходима генерация коротких зондирующих импульсов магнитной индукции с последующей регистрацией компонент вектора магнитной индукции с высокой частотой.

Применение малогабаритного излучателя зондирующих импульсов позволит решать ряд прикладных инженерных, археологических, гидрогеологических задач, связанных с наличием малоразмерных проводящих погребенных объектов.

В этой работе представлена разработка прототипа излучающей части аппаратуры МПП – магнитного диполя и генератора токовых импульсов

Импульсный генератор тока

Функциональная схема импульсного генератора тока приведена на Рис. 1.

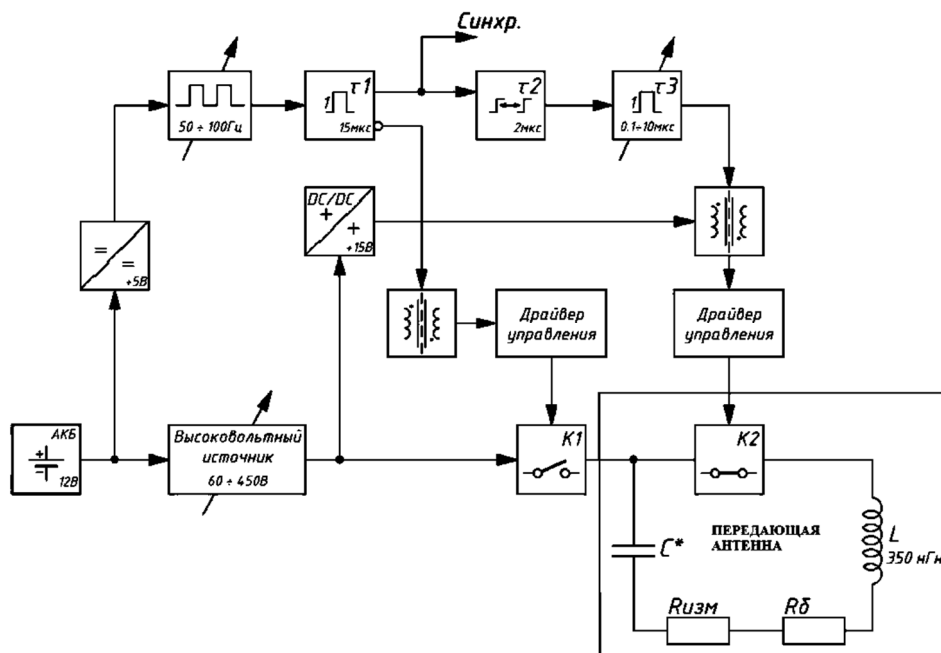


Рис. 1. Функциональная схема импульсного генератора тока

Импульсный генератор тока состоит из следующих частей: высоковольтный источник напряжения, повышающий импульсный стабилизатор (бустер), система формирования управляющих импульсов, быстродействующий ключ $K1$ (МОП транзисторы). Излучающая антенна выполнена в виде отдельного блока и состоит из накопительного конденсатора C , мощного быстродействующего ключа $K2$, согласующего резистора $R_б$ и вертикального магнитного диполя (круглый виток) L .

Характеристики импульсного генератора:

- Напряжение питания – 12 В (аккумуляторная батарея);
- Диапазон напряжения высоковольтного источника – от 60 до 500 В;
- Частота повторения импульсов – от 30 до 100 Гц;
- Габаритные размеры – 130 x 80 x 45 мм;
- Вес – 0.3 кг;
- Максимальная потребляемая мощность – 5 Вт;

- Время непрерывной работы – 14 ч (при емкости аккумулятора 7.5 А·ч).

Вертикальный магнитный диполь

В качестве излучателя магнитного поля изготовлен малогабаритный вертикальный магнитный диполь (МВД) представляющий собой плоский виток в виде тонкого алюминиевого диска диаметром 356 мм с центральным отверстием диаметром 168 мм (Рис. 2).

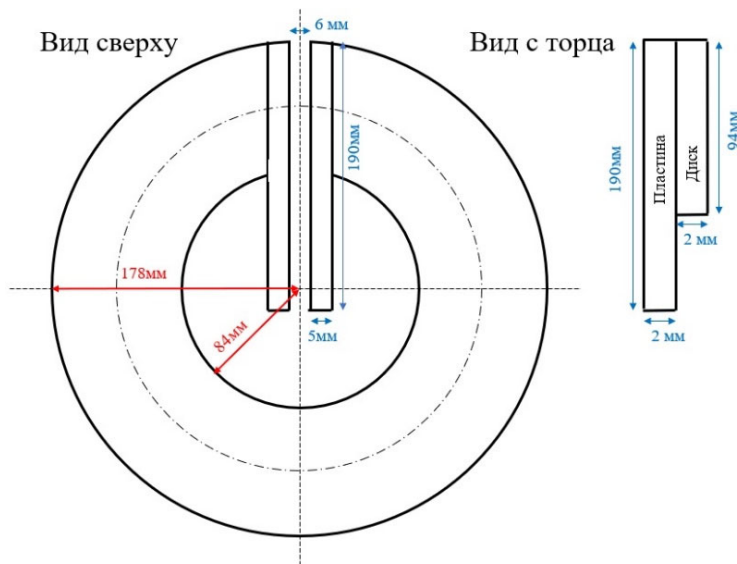


Рис. 2. Схематичное изображение излучателя

Соединение с генератором выполнено в виде симметричной полосковой линии (две медных шины сечением 5x2 мм, расстояние между полосками 6 мм). Такая конструкция выбрана с учетом возможности подключения диполя к мощному генератору субнаносекундных импульсов на основе полупроводниковых диодов с дрейфовым механизмом восстановления напряжения (ДДРВ)

Расчёт индуктивности плоского диска выполняется по формуле (1) [4]:

$$L = \frac{\mu_0}{8\pi} \cdot \partial\Phi = 320 [\text{нГн}] \quad (1)$$

где: $d = (R_{\text{внеш}} + R_{\text{внут}}) = 0.262 [\text{м}]$ – средний диаметр; Φ – коэффициент преобразования, зависящий от отношения $\rho = \frac{r}{d}$.

При малых значениях $\rho < 0.5$ для повышения точности коэффициент преобразования рассчитывается по формуле (2):

$$\Phi = 4\pi \left[\left(1 + \frac{\rho^2}{24} + \frac{11}{2880}\rho^4 + \dots \right) \ln \frac{4}{\rho} - \frac{1}{2} + \frac{43}{288}\rho^2 + \frac{1}{150}\rho^4 + \dots \right] = 24.386 \quad (2)$$

где: $\rho = \frac{r}{d} = 0.36$; r – ширина диска.

На основе трёх лабораторных экспериментов подтвержден номинал индуктивности МВМД методом резонанса. МВМД включен в параллельный LC колебательный контур, на который с помощью генератора специальных сигналов подавался синусоидальный сигнал с частотой $0 \div 10$ МГц. По результатам проведенных экспериментов определено среднее значение $L = 350$ нГн [5, 6].

Магнитная индукция в центре диполя рассчитывается по формуле (3) [7]:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 J}{2R_{внеш}} \quad (3)$$

где: J – сила тока.

Выполним расчет собственной резонансной частоты этого витка. Для расчета резонансной частоты, воспользуемся формулой Томсона для последовательного колебательного контура (4) [5]:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}} \approx 215 [\text{МГц}] \quad (4)$$

где: $C_0 = 1.57$ [пФ] – собственная ёмкость излучателя, рассчитанная по геометрическим размерам витка и подводящих линий.

Переходной процесс

Формирование импульса тока производится путем разряда накопительного конденсатора на индуктивность через мощный быстродействующий коммутатор $K2$.

Для реализации апериодического процесса разряда накопительного конденсатора служит балластный резистор.

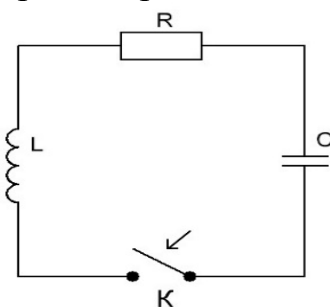


Рис. 3. Эквивалентная схема для расчета переходного процесса

Предварительно был произведен расчёт переходного процесса для эквивалентной схемы RLC контура (Рис. 3). МВМД представлен в виде индуктивности. Конденсатор изначально заряжается до $U_0 \approx 450 \text{ В}$, в последствии разряжается через мощный быстродействующий коммутатор на полевых транзисторах. Номинал сопротивления подбирается из условия апериодического переходного процесса (близкий к критическому) (5):

$$R \geq 2\sqrt{L/C} \quad (5)$$

Расчёт производился классическим методом, выведены выражения (6), (7), построены графики зависимости амплитуды тока через индуктивность и напряжения на индуктивности от t (Рис. 4) [6, 8]:

$$i_l(t) = \frac{U_0}{2L\sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}} \cdot \left[e^{\left(-\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}\right)t} - e^{\left(-\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}\right)t} \right] \quad (6)$$

$$U_l(t) = \frac{U_0 R}{4L\sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}} \cdot \left[\left(1 + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}\right) e^{\left(-\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}\right)t} - \left(1 - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}\right) e^{\left(-\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}\right)t} \right] \quad (7)$$

где: $\delta = \frac{R}{2L}$; $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

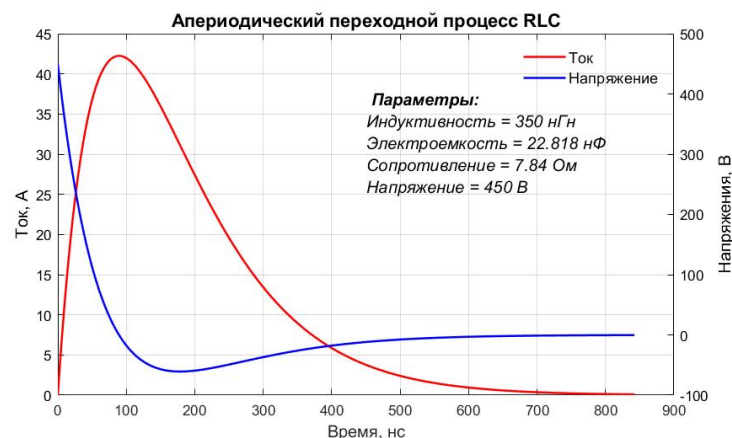


Рис. 4. Графики тока и напряжения

В табл. 1 представлены расчетные параметры формируемых сигналов при разном наборе номиналов RC , где: I_{max} – максимальная амплитуда силы тока; t_{max} – время достижения максимальной амплитуды; $\Delta t_u^{1\%}$ – длительность импульса по уровню $0.01I_{max}$; t_f – длительность фронта; t_{cp} – длительность среза; B_z – магнитная индукция в центре диполя.

Таблица 1

Параметры выходного сигнала при напряжении 450 В

I_{max}, A	$t_{max}, нс$	$\Delta t_u^{1\%}, нс$	$t_f, нс$	$t_{cp}, нс$	$B_z, мкТл$
5.65	12.23	107.66	11.68	78.68	19.9
13.37	28.16	209.20	28.38	176.24	47.2
42.24	89.34	683.28	89.29	561.50	149.1
131.96	283.66	2404.24	274.5	1812.36	465.8

Результаты

Общий вид прототипа разработанной системы приведен на рис. 5. Проводится измерение параметров импульса тока в лабораторных условиях. Справа находится блок электронного обеспечения; высоковольтный генератор со схемами управления, аккумуляторная батарея и тестер расположены непосредственно на внешней стороне излучающей антенны.

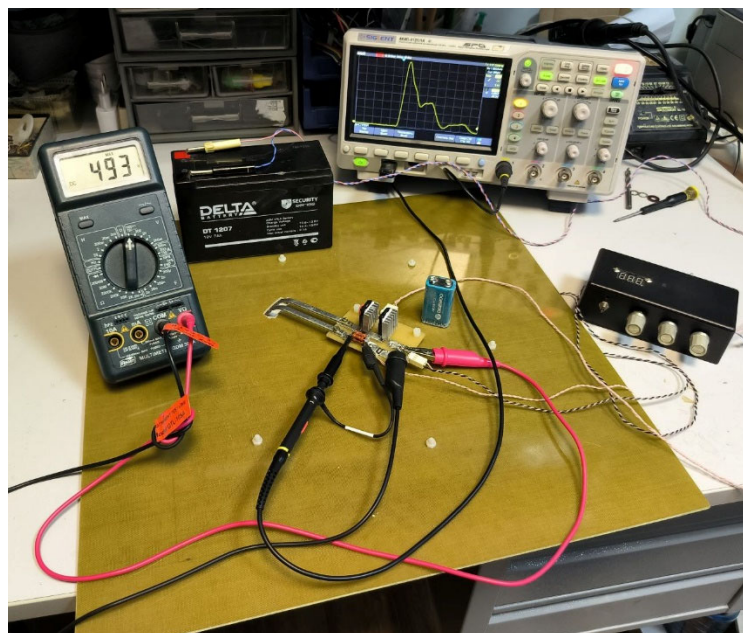


Рис. 5. Общий вид прототипа разработанной системы

На Рис. 6-9 представлены результаты прямых измерений параметров импульсов тока через излучатель. Измерения проведены цифровым осциллографом путем регистрации напряжения на балластном резисторе.

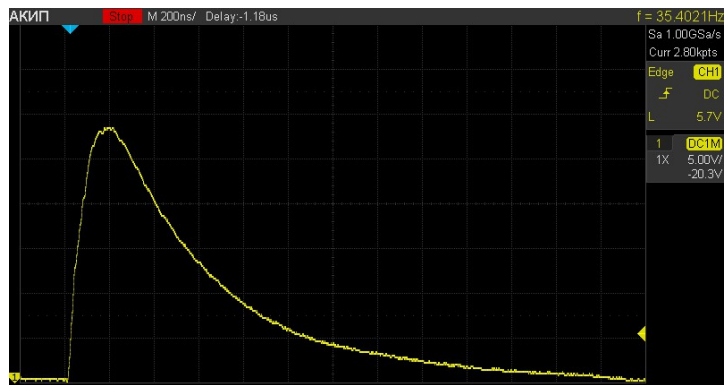


Рис. 6. Импульс 2000 нс. Максимальное значение тока 115 А

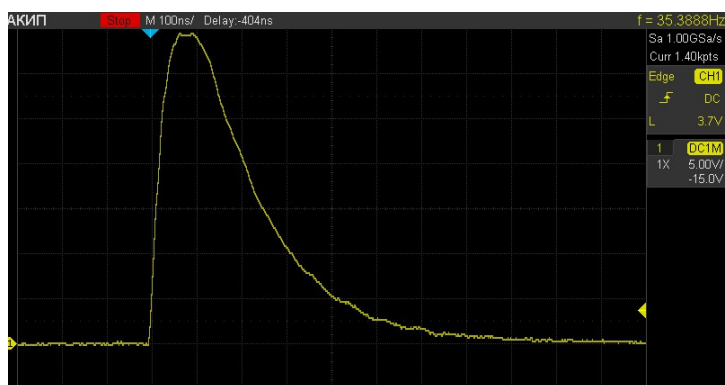


Рис. 7. Импульс 650 нс. Максимальное значение тока 45 А



Рис. 8. Импульс 240 нс. Максимальное значение тока 15 А



Рис. 9. Импульс 110 нс. Максимальное значение тока 6.5 А

Результаты лабораторных испытаний в основном подтвердили правильность предварительных расчетов. Отмечается отклонение формы импульса от классической при формировании импульсов длительностью менее 100 нс.

Обсуждение

Минимальная глубина зондирования в основном определяется электрофизическими параметрами геологической среды (удельное сопротивление и относительная диэлектрическая проницаемость). Как показано в работе [1] низкоомные геологические среды (четвертичные глинистые грунты (суглинки, глины)) с удельным сопротивлением менее 50 Ом·м имеют среднее значение относительной диэлектрической проницаемости равное 14, т.е. групповая скорость распространения сигнала составляет около 0.08 м·нс. При использовании зондирующих импульсов длительностью от 100 до 200 нс минимальная глубина зондирования таких сред составит от 2 до 4 м, что расширяет область использования МПП при решении практических задач инженерной геофизики.

Разработанная система имеет следующие преимущества перед традиционными:

- Малые размеры 0.5x0.5 м позволяют улучшить пространственное разрешение геоэлектрической структуры изучаемой среды и оперативно выполнять профильные зондирования;
- Отсутствие подводных питающих проводов, малое электрическое сопротивление диполя и возможность размещения генераторной петли над уровнем дневной поверхности уменьшают паразитное влияние антенного поляризационного эффекта.

Заключение

В ходе работы был разработан прототип системы генерации коротких импульсов магнитного поля с малогабаритным вертикальным магнитным диполем с возможностью формирования импульсов длительностью $\sim 100 \div 2000$ нс, с амплитудой тока $\sim 6 \div 115$ А. При данных параметрах величина компоненты магнитной индукции B_z в центре диполя составит соответственно $\sim 20 \div 400$ мкТл.

Учитывая малую стоимость комплектующих изделий (около 10000 рублей) и простоту изготовления, такая система имеет хорошие перспективы для широкого практического применения.

Разработанная конструкция имеет возможность подключения диполя к мощному высоковольтному генератору субнаносекундных импульсов на основе полупроводниковых диодов с дрейфовым механизмом восстановления напряжения (ДДРВ). Использование такого генератора позволяет генерировать импульсы длительностью от 50 нс с пиковым током до 500 А.

Планируется выполнение этих работ в текущем году.

Благодарности

Исследования проведены за счет средств Программы фундаментальных научных исследований РФ. Проект FWZZ-2022-0027: «Новые технологии внела-

бораторного химического анализа и контроля, прецизионных измерений физических полей природных и техногенных объектов».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черемисин А.А. и др. Возможности сверхширокополосной георадиолокации низкоомных геологических сред // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59. – №. 2. – С. 256-267.
2. Хабибуллов, Р.К. Индуктивные методы электроразведки. Основы теории и интерпретации / Под редакцией В.В.Кормильцева // Учеб.-метод. пособие. – Казань: Изд.-во КГУ, 2003. – 89 с.
3. Хмелевский В.К., Бондаренко В.М. Электроразведка. Справочник геофизика. Книга 2. – М.: Недра, 1989. – 378 с.
4. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей. 3-е изд., перераб. и доп – Л.: Энергоатомиздат, 1986.
5. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь. – 1994. – С. 458.
6. Попов В. П. Основы теории цепей: Учебник для вузов спец. «Радиотехника». – М.: Высш. шк. – 1985. – 487 с.
7. Давыдков В. В. Физика: механика, электричество и магнетизм: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательство Юрайт. – 2017. – 169 с.
8. Атабеков Г. И. и др. Теоретические основы электротехники. – М.: Энергия. – 1978. – 592 с.

© Е. С. Хлыстун, И. Н. Злыгостев, 2023