

УДК 537.632/.636

DOI: [10.26102/2310-6018/2022.37.2.004](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2022.37.2.004)

Исследование процессов в установке для модификации биологических клеток магнитным полем при использовании источника переменного тока с высоким выходным сопротивлением

В.Н. Павлов¹, Ю.А. Легенький¹, В.О. Корниенко¹, В.Н. Калаев^{2✉},
А.П. Преображенский³, И.Я. Львович³

¹Донецкий национальный университет, Донецк, Донецкая Народная Республика

²Воронежский государственный университет,
Воронеж, Российская Федерация

³Воронежский институт высоких технологий,
Воронеж, Российская Федерация
dr_huixs@mail.ru✉

Резюме: В статье на основе предложенных методов моделирования выявлены погрешности, возникающие при использовании наиболее распространенных источников тока с низким выходным сопротивлением (усилителей напряжения), питающих катушки установок для модификации биологических объектов магнитным полем. Для иллюстрации работоспособности рассматриваемых моделей приводятся осциллограммы изменения от времени индукции магнитного поля в катушке вышеуказанной установки, при питании ее от усилителя напряжения, имеющего низкое выходное сопротивление. В качестве альтернативы предлагается использование разработанного и собранного специализированного источника тока с высоким выходным сопротивлением, управляемого напряжением (ИТУН), предназначенного для работы с индуктивной нагрузкой. Магнитное поле, создаваемое катушкой установки, однозначно соответствует току, текущему через нее от вышеуказанного источника тока. В статье приводится описание макета такого источника тока, а также быстродействующей системы ограничения входного сигнала, позволяющей защитить силовые элементы схемы от перегрузок, возникающих при работе на индуктивную нагрузку. В качестве иллюстрации эффективности этого метода создания магнитного поля приводятся осциллограммы изменения от времени индукции магнитного поля, создаваемого в катушке вышеуказанной установки, при питании ее от макета источника тока. Для реализации макета магнитной установки и контроля состояния измеряемого магнитного поля был дополнительно разработан и собран быстродействующий магнитометр, позволяющий считывать данные в режиме реального времени.

Ключевые слова: магнитная установка, ИТУН, магнитометр, магнитное поле, модификация биологических объектов.

Для цитирования: Павлов В.Н., Легенький Ю.А., Корниенко В.О., Калаев В.Н., Преображенский А.П., Львович И.Я. Исследование процессов в установке для модификации биологических клеток магнитным полем при использовании источника переменного тока с высоким выходным сопротивлением. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2022;10(2). Доступно по: <https://moitvvt.ru/journal/pdf?id=1074> DOI: 10.26102/2310-6018/2022.37.2.004

Investigation of processes in a set for biocell modification by means of a magnetic field using an alternative current source with high output resistance

V.N. Pavlov¹, Yu. A. Legenkiy¹, V.O. Kornienko¹, V.N. Kalaev²✉,
A.P. Preobrazhenskiy³, I.Y. Lvovich³

¹ Donetsk National University, Donetsk, Donetsk People's Republic

² Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation

³ Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, Russian Federation
dr_huixs@mail.ru✉

Abstract: In the article, errors that occur when using the most common current sources with low output resistance (voltage amplifiers), feeding coils of biological object modification sets by means of a magnetic field are identified with the aid of the proposed modeling methods. To exemplify the operability of the models under consideration, oscillograms of changes in the magnetic field induction time in the coil of the set, when it is powered by a voltage amplifier having a low output resistance, are given. As an alternative, it is suggested to employ a developed and assembled specialized current source with a high output resistance, voltage-controlled (ITUN), designed to work with an inductive load. The magnetic field, generated by the coil of the set, fully corresponds to the current, flowing through it from the current source. The article describes the layout of such current source, as well as a high-speed system for limiting the input signal, which enables the protection of the circuit power elements from overloads that occur when working on an inductive load. As an illustration of the effectiveness of the magnetic field creation method, the oscillograms of the change from the induction time of the magnetic field produced in the coil of the set, when it is powered from the current source layout, are presented. In order to implement the layout of the magnetic set and monitor the state of the magnetic field being measured, a high-speed magnetometer was additionally designed and built, which allows reading data in real time.

Keywords: magnetic set, ITUN, magnetometer, magnetic field, modification of biological objects.

For citation: Pavlov V.N., Legenkiy Yu.A., Kornienko V.O., Kalaev V.N., Preobrazhenskiy A.P., Lvovich I.Y. Investigation of processes in a set for biocell modification by means of a magnetic field using an alternative current source with high output resistance. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2022;10(2). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1074> DOI: 10.26102/2310-6018/2022.37.2.004 (In Russ.).

Введение

Технологический прогресс и постоянно растущий спрос на электроэнергию вызывает непрерывное увеличение количества искусственных источников электромагнитных полей индустриальной частоты, воздействующих на окружающую среду [1-6]. Присутствие электростанций, высоковольтных распределительных устройств, линий электропередачи, трансформаторных станций и многих электрических устройств оказывает воздействие на человека электромагнитными полями чрезвычайно низкой частоты [7, 8]. Кроме того, в современных электронных устройствах вместо трансформаторов используются импульсные преобразователи энергии, вызывающие появление высших, особенно нечетных, гармоник электрического напряжения и тока. Воздействие электромагнитных полей на живые организмы может приводить к различным биологическим эффектам в зависимости от интенсивности, частоты, дозы и времени воздействия электромагнитных полей. Как следствие, растет обеспокоенность общественности по этому поводу. Вышеуказанные причины актуализируют исследования, которые связаны с моделированием воздействия магнитных полей на биологические объекты. Например, классическая установка для таких исследований

представляет собой катушку или систему катушек, внутри которых расположены исследуемые образцы. Более сложные системы встраиваются в инкубаторы, где поддерживается на постоянном уровне концентрация CO₂, температура, влажность, при необходимости устанавливается освещение [9, 10]. Есть установки, в которых производятся даже измерения электрических полей, наводимых переменным магнитным полем [11].

В ходе моделирования и проведения реальных экспериментов эти устройства объединяет необходимость в источнике тока, текущего через систему катушек и создающего магнитное поле. Источник может создавать постоянный, или переменный ток, или их суперпозицию, если есть необходимость в постоянном подмагничивании. Чаще всего в качестве источников тока используют регулируемые трансформаторы [9, 12], если исследования проводятся с использованием полей промышленной частоты. Если необходимы более низкие или более высокие частоты при моделировании и реализации практических решений, используются усилители низкой частоты [10] (чаще всего мощные аудио усилители). Катушки, создающие магнитные поля в таких экспериментах, имеют большое количество витков, большую площадь и, как следствие, большую индуктивность [9]. Это позволяет предположить, что эффективно подобные устройства будут работать только с сигналами, близкими по характеристикам к синусоиде, а получение импульсных магнитных полей, имеющих временные характеристики, отличные от синусоидальных, будет сопряжено с определенными трудностями. Для иллюстрации вышесказанного были произведены процессы моделирования измерения магнитного поля, создаваемого катушкой экспериментальной установки такого типа.

Таким образом, целью работы было использование методов моделирования для исследования возможностей улучшения характеристик модифицированных биологических клеток на основе применения источника переменного тока с высоким выходным сопротивлением.

К выходу аудио усилителя, имеющего низкое выходное сопротивление и диапазон воспроизводимых частот 20 Гц – 20 кГц, подключена катушка с индуктивностью 182,1 мГн, имеющая активное сопротивление 16,6 Ом. Источником сигнала для усилителя служил функциональный генератор, позволяющий получать колебания различной формы. Один канал осциллографа был подключен к выходу усилителя параллельно катушке, второй к выходу быстродействующего магнитометра, показывающего индукцию магнитного поля, создаваемого катушкой. Частота прикладываемых к катушке колебаний составила 50 Гц. В процессе измерений изменялась форма прикладываемых ко входу усилителя колебаний. С целью поддержания постоянной пиковой индукции, измеряемой магнитометром – 3мТ, производилась подстройка уровня сигнала, подаваемого на вход усилителя.

Рисунки 1-3, приводимые ниже, иллюстрируют полученные результаты. Желтый цвет имеет осциллограмма выходного напряжения усилителя, прикладываемого к катушке, зеленый – выходное напряжение магнитометра, регистрирующего магнитную индукцию, создаваемую током, протекающим в этот момент через катушку.



Рисунок 1 – Визуализация синусоидального напряжения, поданного на катушку
 Figure 1 – Visualization of the sinusoidal voltage, applied to the coil

Как видно, ток, и, как следствие, магнитное поле, создаваемое катушкой, также имеют вид синусоиды. Отставание тока от напряжения примерно на 50 градусов определяется активно-индуктивным характером нагрузки усилителя.

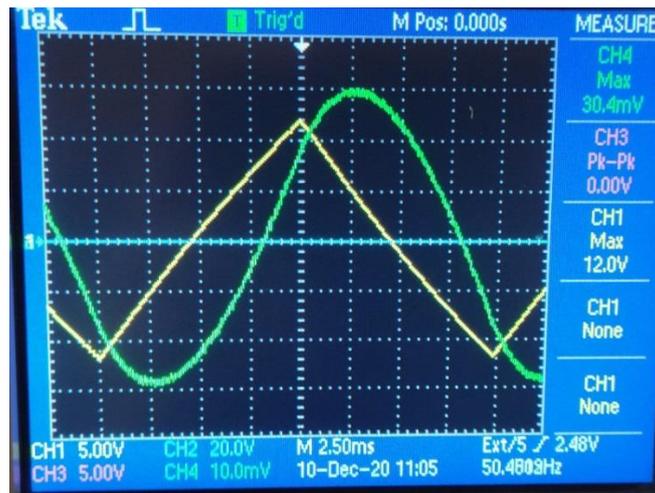


Рисунок 2 – Визуализация треугольного напряжения, поданного на катушку
 Figure 2 – Visualization of the triangular voltage, applied to the coil

Отклонение формы питающего напряжения от линейной объясняется тем, что полоса пропускания усилителя ограничена снизу частотой 20Гц. Как видно, временная форма создаваемого поля далека от треугольной и напоминает скорее искаженную синусоиду.

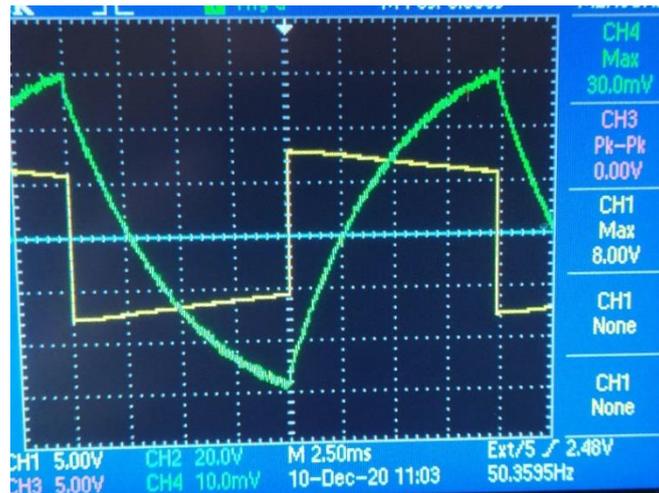


Рисунок 3 – Осциллограмма меандра, поданного на катушку
Figure 3 – Waveform of the meander, fed to the coil

Форма выходного напряжения усилителя отличается от прямоугольной по той-же причине, что была указана для Рисунка 2. Создаваемая индукция имеет форму искаженного треугольника. Это объясняется наличием активного сопротивления у провода, из которого изготовлена катушка. Наклон кривой определяется величиной индуктивности катушки.

Следует отметить следующее:

- 1) Временные характеристики магнитного поля, создаваемого катушкой, совпадают с характеристиками, задаваемыми входным сигналом только в случае, когда используется синусоидальная форма колебаний. Если не учитывать сдвиг по фазе.
- 2) Для получения одинакового пикового значения магнитной индукции, создаваемой катушкой питаемой сигналом различной формы, необходимо подстраивать амплитуду питающего катушку напряжения.
- 3) Форму импульса напряжения искажает ограниченная снизу полоса воспроизводимых частот стандартного аудио усилителя.
- 4) Нагрев катушки со временем приводит к уменьшению создаваемой магнитной индукции.
- 5) Величина создаваемого магнитного поля сильно зависит от частоты прикладываемого напряжения.

Исходя из вышеперечисленного следует сделать вывод, что для создания импульсных полей с использованием катушек большой индуктивности, аудио-усилители с низким выходным сопротивлением, т.е. поддерживающего жесткое соответствие между входным сигналом и падением напряжения на нагрузке вне зависимости от тока через нее, – не подходят.

Поскольку параметры магнитного поля, создаваемого катушкой, однозначно определяются величиной тока, протекающего через нее, то требуется применение специальных устройств – источников тока, управляемых напряжением (ИТУН), т.е. устройств с высоким выходным сопротивлением, поддерживающим жесткое соответствие между входным сигналом и током через нагрузку (катушку установки), вне зависимости от падения напряжения на нагрузке.

Макет устройства, реализующего этот принцип, был собран и испытан в составе экспериментальной установки. Его устройство и результаты испытания описаны ниже.

ИТУН, функциональный состав и принцип работы

Функциональный состав устройства. Блок-схема, представленная на Рисунке 4, иллюстрирует принцип работы устройства.

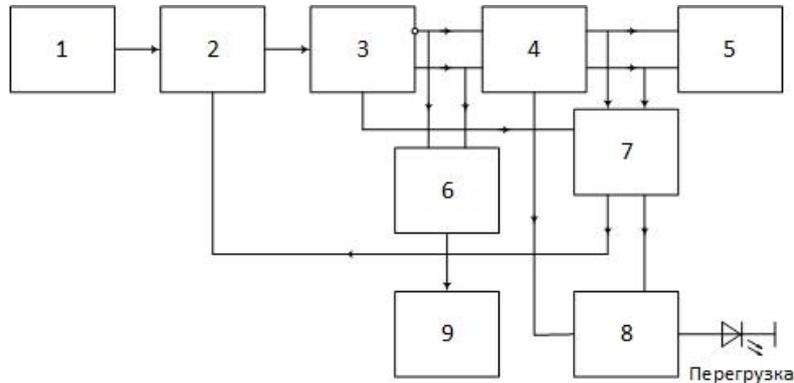


Рисунок 4 – Принцип работы ИТУН

Обозначения: 1 – генератор, 2 – управляемый ограничитель, 3 – фазорасщепитель, 4 – усилитель, 5 – нагрузка, 6 – пиковый детектор, 7 – узел защиты, 8 – блок индикации, 9 – вольтметр.

Figure 4 – The principle of ITUN operation

Legend: 1 – generator, 2 – controlled limiter, 3 – phase splitter, 4 – amplifier, 5 – load, 6 – peak detector, 7 – protection unit, 8 – display unit, 9 – voltmeter.

Сигнал с выхода функционального генератора 1, определяющего необходимые временные параметры тока, текущего через нагрузку, поступает на управляемый ограничитель 2 и далее на фазорасщепитель 3, формирующий два сигнала, идентичных входному, но с противоположными фазами. Эти сигналы необходимы для работы пикового детектора 6 и усилителя мощности 4. Пиковый детектор 6 регистрирует пиковое значение тока, поддерживаемого в настоящий момент усилителем 4 через нагрузку, и откалиброван так, что величина напряжения на его выходе показывает максимальное за период значение выходного тока. Выходному току 1А соответствует напряжение 1В, регистрируемое вольтметром с высоким входным сопротивлением 9, подключаемым к соответствующему разъему. Узел защиты 7 измеряет падение напряжения на мощных транзисторах усилителя мощности и вырабатывает напряжение, управляющее ограничителем 2. Блок индикации 8 управляет светодиодным индикатором перегрузки. На один вход блока индикации поступают импульсы напряжения от узла защиты, на другой импульсы клиппирования, формируемые усилителем мощности 4 в случае, если пиковая величина напряжения, падающего на нагрузку 5, начинает приближаться к напряжению питания. Функция блока индикации состоит в том, чтобы запустить индикатор «Перегрузка» на различимое глазом время даже при очень коротких импульсах перегрузки.

Усилитель мощности 4 и узел защиты 7 являются определяющими узлами устройства и поэтому требуют отдельного рассмотрения.

Усилитель мощности. Упрощенная схема усилителя мощности с высоким выходным сопротивлением 4 (Рисунок 4), представлена на Рисунке 5. Он собран по схеме мостового усилителя с перекрестно-симметричной обратной связью по току.

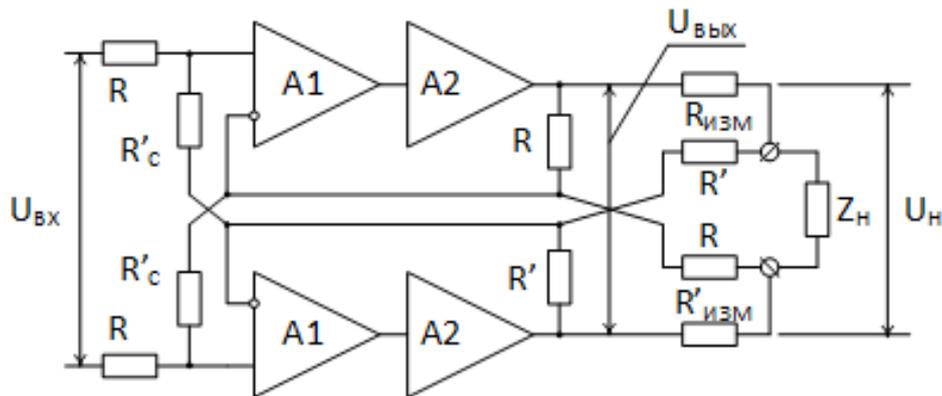


Рисунок 5 – Упрощенная схема усилителя мощности
Figure 5 – Simplified power amplifier circuit

В качестве входных дифференциальных усилителей А1, А'1 использованы микросхемы аудио-усилителей TDA7293. А2, А'2, – комплементарные эмиттерные повторители на транзисторах КТ864, КТ865, облегчают режим работы микросхем по току при повышенных нагрузках.

Сопротивления одинаковой величины, $R_{изм}$ и $R'_{изм}$ используются в качестве датчиков тока. Обратная связь осуществляется с помощью резисторов R и R' , также имеющих одинаковое сопротивление.

Дифференциальные усилители А1, А'1 следят за тем, чтобы падение напряжения на датчиках тока равнялось входному напряжению $U_{вх}$. Величина падения напряжения на датчиках тока $R_{изм}$, $R'_{изм}$ получается, если вычесть U_n напряжение, падающее на нагрузке Z_n из напряжения $U_{вых}$, измеренного между выходами А2, А'2 в текущий момент времени. При одинаковых номиналах сопротивлений R и R' выходной ток будет определяться только напряжением $U_{вх}$ и сопротивлениями $R_{изм}$ и $R'_{изм}$. Таким образом организуется отрицательная обратная связь по току в нагрузке, позволяющая получить высокое выходное сопротивление усилителя и реализовать тем самым ИТУН.

Сопротивления R_c и R'_c нужны для того, чтобы привязать синфазное выходное напряжение усилителя к синфазному входному напряжению, стабилизировав тем самым выходное напряжение схемы относительно средней точки источников питания и на параметры схемы не влияют.

Узел защиты. Как упоминалось ранее в выходных каскадах усилителя мощности использованы усилители тока, собранные на мощных комплементарных биполярных транзисторах. В нашем случае это КТ864, КТ865. Поскольку нагрузка устройства имеет активно-индуктивный характер, выходной усилительный каскад работает практически в режиме короткого замыкания. Т. е. максимальное пиковое значение тока нагрузки соответствует максимальному падению напряжения на силовых транзисторах выходного каскада. Это, по сути, режим короткого замыкания.

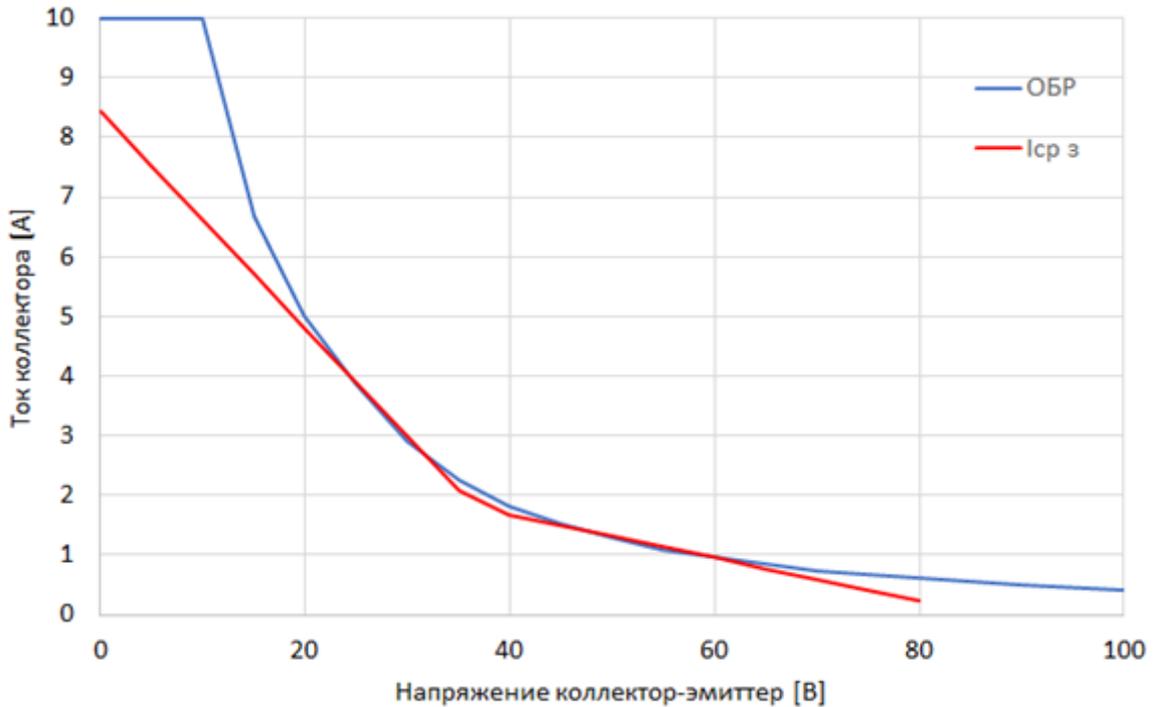


Рисунок 6 – Область безопасных режимов (ОБР) транзисторов
Figure 6 – The area of safe modes (ASM) of transistors

Как известно величина допустимой мощности, рассеиваемой транзистором, сильно зависит от величины приложенного к нему в этот момент напряжения. График, отражающий эту зависимость, называется графиком ОБР (Область Безопасных Режимов) транзистора.

На Рисунке 6 показана ОБР транзисторов, используемых в рассматриваемом устройстве (синий цвет). Выход за пределы области напряжений и токов, ограничиваемой этим графиком, приводит к порче транзистора. Узел защиты 7 помогает избежать этого. Он вырабатывает управляющее напряжение, определяющее предельный уровень входного сигнала, задаваемый ограничителем 2. В случае если падение напряжения на выходном транзисторе при токе, заданном входным сигналом, приближается к критическому уровню, определяемому ОБР, управляющее напряжение уменьшается, что приводит к ограничению амплитуды входного сигнала до безопасного уровня. Модель ОБР, по которой работает узел защиты, выделена красным цветом. Структурная схема узла защиты 7 (Рисунок 4), представлена на Рисунке 7.

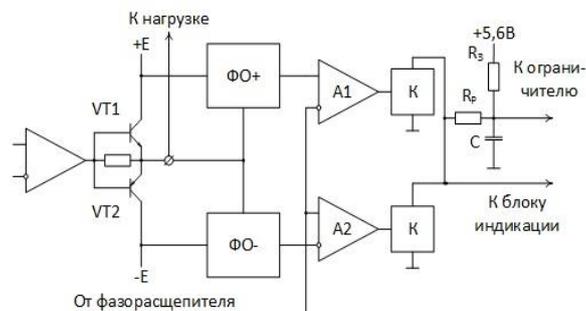


Рисунок 7 – Структурная схема узла защиты
Figure 7 – Block diagram of the protection node

Напряжение на конденсаторе С определяет максимальный уровень ограничения входного сигнала. В отсутствие перегрузки конденсатор С, через сопротивление R_3 заряжен до уровня примерно 5,6 В. Это соответствует максимальному уровню ограничения входного сигнала 5В, соответственно максимально допустимому току в нагрузке – 5А.

Кривые напряжений и тока нагрузки, иллюстрирующие основные процессы в элементах узла защиты для наиболее характерных видов нагрузки, показаны на Рисунках 8-10.

Мгновенное падение напряжения на мощных выходных транзисторах измеряют формирователи огибающей (ФО). VT1 подключен к ФО+, VT2, к ФО-. В зависимости от величины полученного напряжения, формируется сигнал, определяющий величину допустимого тока через нагрузку при данном падении напряжения на соответствующем транзисторе. Сигнал, сформированный ФО+, подан на неинвертирующий вход компаратора А1, выход ФО- подключен к инвертирующему входу компаратора А2. Оставшиеся входы компараторов объединены и на них подан сигнал с выхода фазорасщепителя, определяющий величину тока через нагрузку, поддерживаемого усилителем 4 в момент измерения напряжения на транзисторе. Компараторы сравнивают сигналы, сформированные ФО с сигналом от фазорасщепителя. В случае, если сигнал с выхода фазорасщепителя оказывается больше сигнала какого-либо из ФО, срабатывает в зависимости от полярности А1 или А2, включая соответствующий ключ К. Конденсатор С при этом разряжается через сопротивление R_p , напряжение на нем падает, уменьшая соответственно порог ограничения ограничителя, что приводит к уменьшению уровня сигнала, подаваемого на усилитель мощности, и, как следствие, величины тока нагрузки.

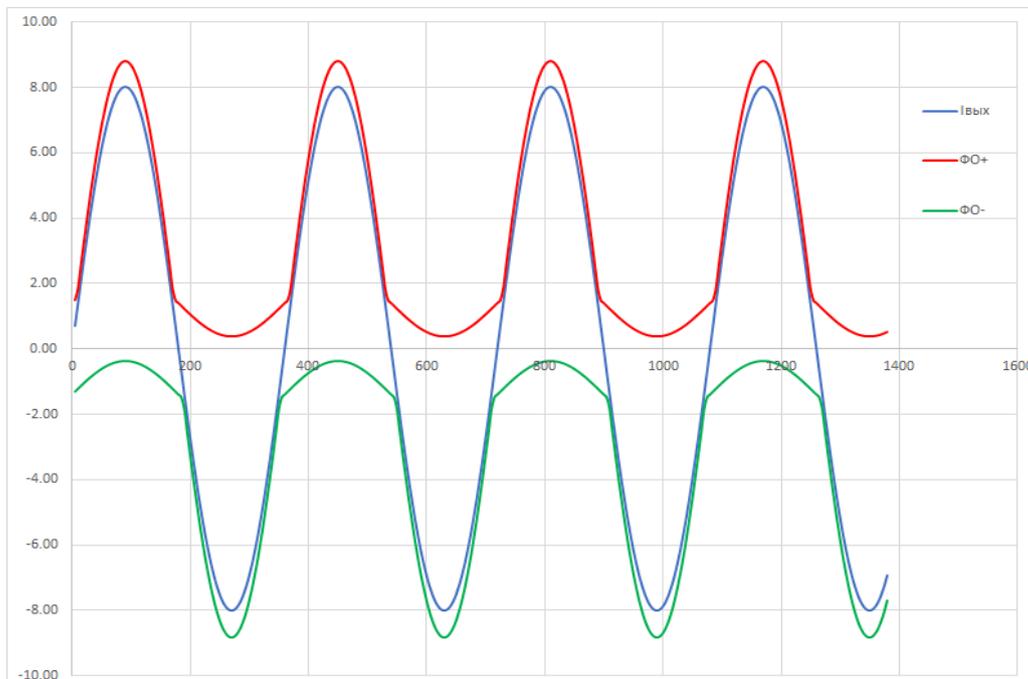


Рисунок 8 – Активная нагрузка
 Figure 8 – Active load

Ток в нагрузке находится в фазе с напряжением. Имеет пиковую амплитуду 8 А и будет ограничен при достижении величины примерно 8,5 А (Рисунок 8).

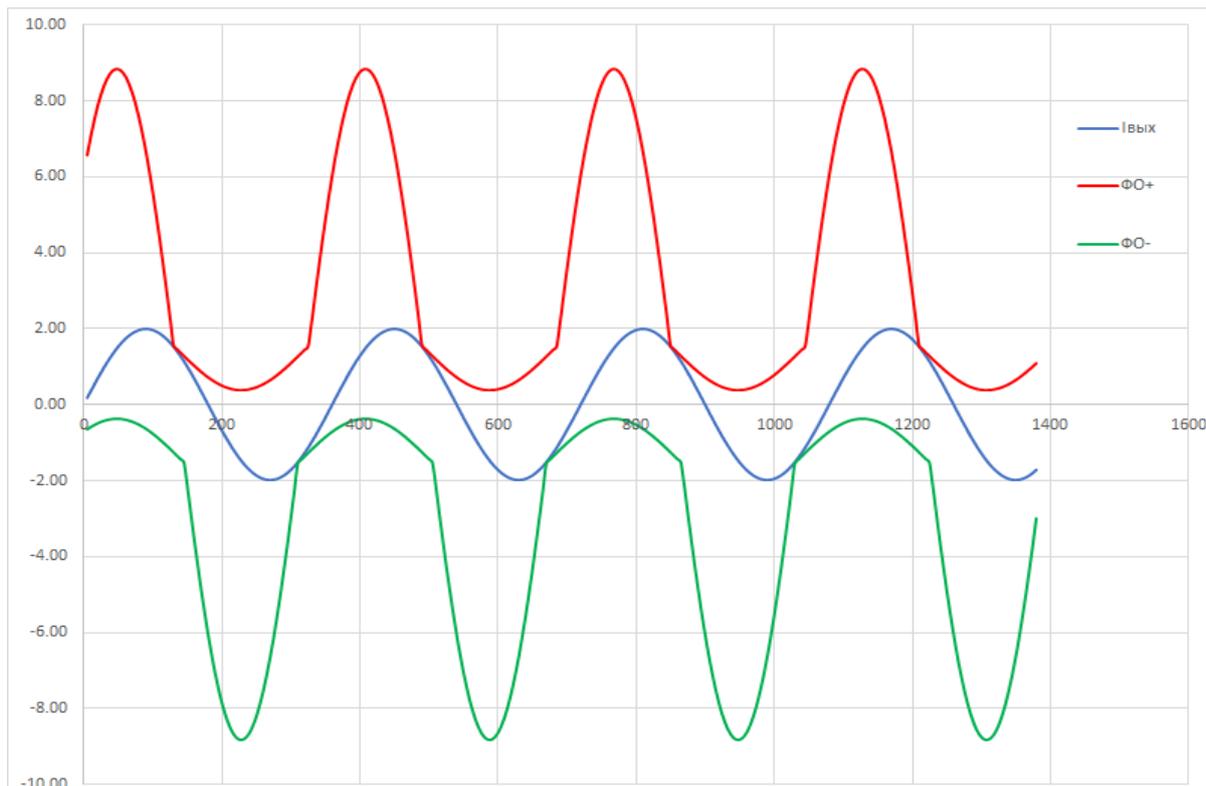


Рисунок 9 – Активно-индуктивная нагрузка
Figure 9 – Active-inductive load

Опережение фазы напряжения относительно тока составляет 42 градуса.
Ограничение сигнала наступит при пиковом токе через нагрузку 2А.

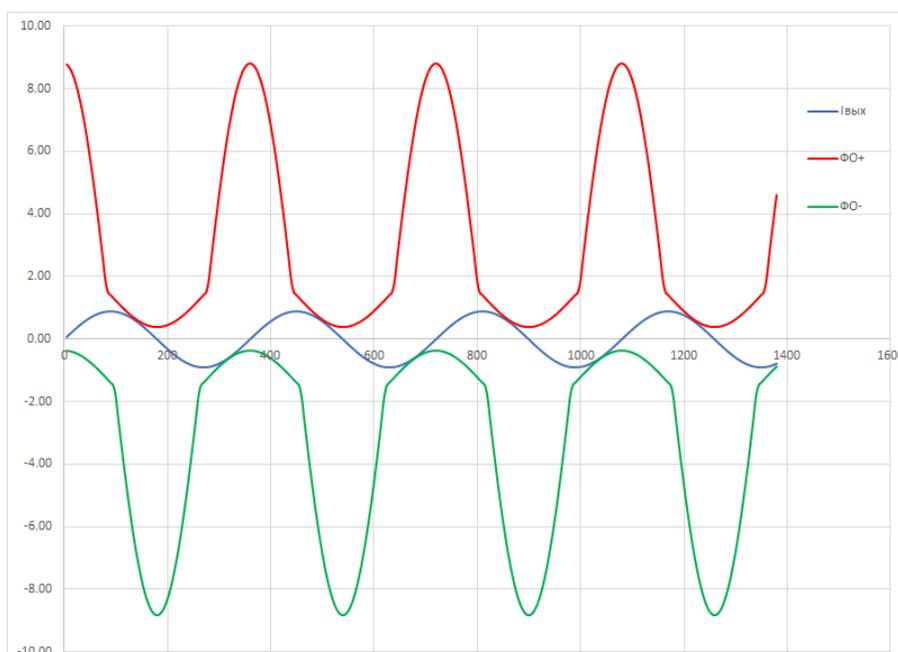


Рисунок 10 – Индуктивная нагрузка (активным сопротивлением катушки можно пренебречь)
Figure 10 – Inductive load (the active resistance of the coil can be neglected)

Положительный сдвиг фазы напряжения относительно тока составляет

90 градусов. При этом ток срабатывания защиты уменьшился до 0,9 А. Как видно из Рисунков 8-10, сдвиг фазы напряжения и тока, обусловленный индуктивным характером нагрузки, приводит к уменьшению максимально допустимого тока в нагрузке в рассмотренном примере примерно в 10 раз.

Результат применения ИТУН для управления током катушки

Ранее описанный прибор был собран в корпус и подключен к катушке с большей индуктивностью и сопротивлением (262,1 мГн и 28 Ом соответственно). На вход прибора подавался сигнал с функционального генератора частотой 21 Гц. Форма сигнала изменялась последовательно: синусоида, треугольник, меандр. Уровень сигнала в течение эксперимента оставался постоянным и был выбран таким, чтобы обеспечить пиковое значение индукции магнитного поля, создаваемого катушкой 3мТ при пиковом значении тока через катушку 0,5 А.

Как и ранее, осциллографом регистрировалось падение напряжения и величина индукции магнитного поля, создаваемого катушкой. Фотографии, представленные ниже, иллюстрируют вышесказанное (Рисунки 11-13). Красным выделено падение напряжения на катушке, зеленым – сигнал на выходе магнитометра, – индукция магнитного поля катушки.

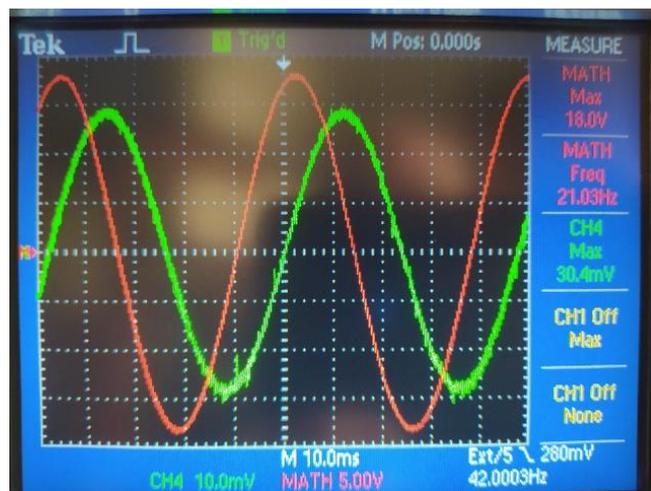


Рисунок 11 – Синусоидальный ток через катушку
Figure 11 – Sinusoidal current through the coil

В сравнении с Рисунком 1 ничего не изменилось. Разница только в том, что ток через катушку стабилизирован и не изменяется при изменении частоты, или сопротивления катушки, вызванного температурными колебаниями.



Рисунок 12 – Линейно изменяющийся ток через катушку
Figure 12 – Linearly varying current through the coil

Крутизна фронта (скорость поворота вектора магнитной индукции) определяется величиной индуктивности катушки (чем она больше, тем медленнее поворот) и запасом по выходному напряжению ИТУН (чем больше возможное выходное напряжение, тем быстрее поворот). В нашем случае запас по напряжению составил ± 80 В (Рисунок 13). В момент изменения направления индукции выходной каскад входит в ограничение. Это видно на кривой выходного напряжения (красный цвет) (Рисунок 13).



Рисунок 13 – Ток через катушку меняется скачком (форма входного сигнала, – меандр)
Figure 13 – The current through the coil changes abruptly (input signal form, – meander)

Также проверялись тактильные ощущения при поднесении предмета, сделанного из магнитного материала, или магнита к катушке. При питании катушки от усилителя, изменение формы входного сигнала не вызывала больших различий в давлении на руку. Питание от ИТУН давало четкие отличия силового воздействия на руку при изменении формы входного сигнала. От плавного, характерного для синусоиды, более резкого для треугольника, до дергающего, характерного для меандра.

Иными словами, применение ИТУН позволяет изменять временной характер силового воздействия магнитного поля на живые клетки изменением формы входного сигнала.

Таким образом, цель работы была достигнута. Основным результатом,

обладающим научной новизной, является определение границ применимости действующего ИТУН.

Недостатки действующего макета ИТУН

Полоса пропускания действующего макета 0-100 кГц. Для большинства приложений, связанных с исследованиями воздействия магнитного поля на биологические объекты, она избыточна. Для питания катушек с большой индуктивностью импульсами тока произвольной формы достаточно полосы 0-1кГц, но требуется высокое выходное напряжение.

Невысокий КПД. Особенно этот недостаток проявляется при индуктивной нагрузке.

Необходимость построения сложной системы защиты.

Разработан ИТУН, функционирующий в ключевом режиме. Действующий макет, работающий в непрерывном режиме, целесообразно использовать с катушками небольшой индуктивности и большими токами. В этом случае полностью реализуется такое преимущество непрерывного режима, как повышенное быстродействие.

Выводы

1) С использованием методов моделирования проведено исследование зависимостей изменения индукции магнитного поля, создаваемого катушкой установки для модификации биологических клеток от времени, при питании ее от источников тока с низким выходным сопротивлением.

2) В ходе экспериментов на основе соответствующих моделей были выявлены недостатки, возникающие при использовании источников тока такого рода. Указаны причины возникновения и способы преодоления этих недостатков.

3) На основе обобщения и анализа результатов моделирования и экспериментальных данных разработан и собран рабочий макет универсального источника тока с высоким выходным сопротивлением (ИТУН). Получены зависимости изменения индукции магнитного поля, создаваемого катушкой установки для модификации биологических клеток от времени при питании ее ИТУН. Результаты исследований позволяют существенно расширять возможности после модификации существующих ИТУН.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Яковлева М.И. *Физиологические механизмы действия электромагнитных полей*. Л.: Медицина; 1973. 175 с.
2. Гичев Ю.П., Гичев Ю.Ю. *Влияние электромагнитных полей на здоровье человека*. Новосибирск: ГПНТБ; 1999. 90 с.
3. Сподобаев Ю.М., Кубанов В.П. *Основы электромагнитной экологии*. М.: Радио и связь; 2000. 239 с.
4. Слукин В.М. Техногенные электромагнитные излучения как фактор экологии населенных пространств. *Академический вестник УралНИИпроект РААСН*. 2010;4:112–116.
5. Александров Ю.А., Остапенко А.А., Гентош А.В. Исследование уровня электромагнитных излучений от некоторых технических устройств. *Вестник Приазовского государственного университета*. 2014;28:188–199.
6. Маслов М.Ю., Сподобаев М.Ю., Сподобаев Ю.М. Электромагнитный мониторинг мегаполиса. *Труды научно-исследовательского института радио*. 2013;4:5–11.
7. Довгуша В.В., Тихонов М.Н., Довгуша Л.В. Влияние естественных и техногенных

- электромагнитных полей на безопасность жизнедеятельности. *Экология человека*. 2009;12:3–9.
8. Тихонов М.Н., Довгуша В.В., Довгуша Л. В. Механизм влияния естественных и техногенных электромагнитных полей на безопасность жизнедеятельности. *Вестник образования и развития науки Российской академии естественных наук*. 2014;18(4):11–21.
 9. Koh E.K., Ryu B.K., Jeong D.Y., Bang I.S., Nam M.H., Chae K.S. A 60-Hz sinusoidal magnetic field induces apoptosis of prostate cancer cells through reactive oxygen species. *International Journal of Radiation Biology*. 2008;84(11):946–947.
 10. Schuderer J., Oesch W., Felber N., Spat D., Kuster N. In vitro exposure apparatus for ELF magnetic fields. *Bioelectromagnetics*. 2005;25(8):582–591.
 11. Bassen H., Litovitz T., Penafiel M., Meister R. ELF in vitro exposure systems for inducing uniform electric and magnetic fields in cell culture media. *Bioelectromagnetics*. 1992;13(3):183–198.
 12. Huang E.Ch., Chang Ch.W., Chen Ch.R., Chuan Ch.Y., Chiang Ch., Shu W.Y., Fan T.C., Hsu I.C. Extremely low-frequency electromagnetic fields cause G1 phase arrest through the activation of the ATM-Chk2-p21 pathway. *PLoS ONE*. 2014;9(8):8.

REFERENCES

1. Yakovleva M.I. *Fiziologicheskie mekhanizmy dejstviya elektromagnitnyh polej*. L.: Medicina; 1973. 175 p. (In Russ.)
2. Gichev Yu.P., Gichev Yu.Yu. *Vliyanie elektromagnitnyh polej na zdorov'e cheloveka = Alleged health effects of electromagnetic fields*. Novosibirsk: GPNTB; 1999. 90 p. (In Russ.)
3. Spodobaev YU.M., Kubanov V.P. *Osnovy elektromagnitnoj ekologii*. M.: Radio i svyaz'; 2000. 239 p. (In Russ.)
4. Slukin V.M. Tekhnogennye elektromagnitnye izlucheniya kak faktor ekologii naselennyh prostranstv. *Akademicheskij vestnik UralNIIproekt RAASN*. 2010;4:112–116. (In Russ.)
5. Aleksandrov Yu.A., Ostapenko A.A, Gentosh A.V. Issledovanie urovnya elektromagnitnyh izluchenij ot nekotoryh tekhnicheskikh ustrojstv. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo universiteta = Reporter of the Priazovskiy State Technical University*. 2014;28:188–199. (In Russ.)
6. Maslov M.Yu., Spodobaev M.Yu., Spodobaev Yu.M. Elektromagnitnyj monitoring megapolisa. *Trudy nauchno-issledovatel'skogo instituta radio*. 2013;4:5–11. (In Russ)
7. Dovgusha V.V., Tihonov M.N., Dovgusha L.V. Vliyanie estestvennyh i tekhnogennyh elektromagnitnyh polej na bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. *Ekologiya cheloveka = Human ecology*. 2009;12: 3–9. (In Russ.)
8. Tihonov M.N., Dovgusha V.V., Dovgusha L. V. Mekhanizm vliyaniya estestvennyh i tekhnogennyh elektromagnitnyh polej na bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. *Vestnik obrazovaniya i razvitiya nauki Rossijskoj akademii estestvennyh nauk = Herald of Education and Science Development of the Russian Academy of Natural Sciences*. 2014;18(4):11–21. (In Russ.)
9. Koh E.K., Ryu B.K., Jeong D.Y., Bang I.S., Nam M.H., Chae K.S. A 60-Hz sinusoidal magnetic field induces apoptosis of prostate cancer cells through reactive oxygen species. *International Journal of Radiation Biology*. 2008;84(11):946–947.
10. Schuderer J., Oesch W., Felber N., Spat D., Kuster N. In vitro exposure apparatus for ELF magnetic fields. *Bioelectromagnetics*. 2005;25(8):582–591.

11. Bassen H., Litovitz T., Penafiel M., Meister R. ELF in vitro exposure systems for inducing uniform electric and magnetic fields in cell culture media. *Bioelectromagnetics*. 1992;13(3):183–198.
12. Huang E.Ch., Chang Ch.W., Chen Ch.R., Chuan Ch.Y., Chiang Ch., Shu W.Y., Fan T.C., Hsu I.C. Extremely low-frequency electromagnetic fields cause G1 phase arrest through the activation of the ATM-Chk2-p21 pathway. *PLoS ONE*. 2014;9(8):8.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Павлов Владимир Николаевич, младший научный сотрудник отдела ФМЯ и ВТСП, ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», Донецк, Донецкая Народная Республика.

e-mail: v.russian@yandex.ru

ORCID: [0000-0001-6716-5553](https://orcid.org/0000-0001-6716-5553)

Vladimir N. Pavlov, Junior Researcher of The Department of Physics of Magnetic Phenomena and High Temperature Superconductivity, Donetsk National University, Donetsk, Donetsk People's Republic.

Легенький Юрий Анатольевич, старший научный сотрудник отдела ФМЯ и ВТСП, ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», Донецк, Донецкая Народная Республика.

e-mail: yu-legen@mail.ru

ORCID:

Yuriy A. Legenkiy, Junior Researcher of The Department of Physics of Magnetic Phenomena and High Temperature Superconductivity, Donetsk National University, Donetsk, Donetsk People's Republic.

Корниенко Владимир Олегович, старший преподаватель кафедры биофизики, ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», Донецк, Донецкая Народная Республика.

e-mail: kornienkovo@mail.ru

ORCID: [0000-0002-7728-8116](https://orcid.org/0000-0002-7728-8116)

Vladimir O. Kornienko, Senior Lecturer of Biophysics Department, Donetsk National University, Donetsk, Donetsk People's Republic.

Калаев Владислав Николаевич, доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры генетики, цитологии и биоинженерии медико-биологического факультета, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: dr_huixs@mail.ru

ORCID: [0000-0003-3986-2460](https://orcid.org/0000-0003-3986-2460)

Vladislav N. Kalaev, Dr. Sci. (Biology), Full Professor, Professor of Genetics, Cytology and Bioengineering Department, Faculty of Medicine and Biology, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation.

Преображенский Андрей Петрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационных систем и технологий, АНОО ВО «Воронежский институт высоких технологий», Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: app@vvt.ru

ORCID: [0000-0002-6911-8053](https://orcid.org/0000-0002-6911-8053)

Andrey P. Preobrazhenskiy, Dr. Sci.(Tech). (Phys&Math.), Ass. Professor, Professor of Department of Information Systems and Technologies, Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, Russian Federation.

Львович Игорь Яковлевич, доктор технических наук, профессор, Ректор АНОО ВО «Воронежский институт высоких технологий», Воронеж, Российская Федерация.
Igor Y. Lvovich, Dr. Sci.(Tech), Professor, Rector, Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, Russian Federation.
e-mail: office@vvt.ru
ORCID: [0000-0003-4236-6863](https://orcid.org/0000-0003-4236-6863)

Статья поступила в редакцию 10.03.2022; одобрена после рецензирования 28.03.2022; принята к публикации 04.04.2022.

The article was submitted 10.03.2022; approved after reviewing 28.03.2022; accepted for publication 04.04.2022.