

Создание макета для измерения параметров импульсного магнитного поля

Я. А. Тяркин

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

slava.tyarkin@mail.ru

Н. В. Романцова

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

nvromantsova@mail.ru

Аннотация. В докладе представлены результаты разработки и макетирования измерительного канала для интеллектуальной измерительной системы анализа параметров импульсного магнитного поля. Данный измерительный канал включает в себя индукционный первичный преобразователь, интегрирующий и нормирующий вторичный преобразователь, АЦП, микроконтроллер и инфракрасный канал связи.

Ключевые слова: импульсное магнитное поле, измерительный канал, интеллектуальная измерительная система, напряженность магнитного поля, индукционный преобразователь

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные электронные компоненты имеют тенденцию к уменьшению габаритных размеров, в следствии чего возрастает их чувствительность к внешним электромагнитным возмущениям. Естественные источники электромагнитных помех, такие как электромагнитные импульсы, создаваемые прямыми и удаленными ударами молнии, могут представлять угрозу для современного электронного оборудования. Улучшение защиты от мощных электромагнитных помех в сложных системах, как бортовая система самолетов, системы управления атомными электростанциями и передовое телекоммуникационное оборудование, является важной исследовательской и технической проблемой [1–2]. При проведении испытаний технических средств на устойчивость к воздействиям магнитных полей, производимых молниевым разрядом, необходимо проводить измерение импульсов магнитного поля, для подтверждения соответствия параметров импульса заданному стандарту.

В соответствии с международной методикой напряженность импульсного магнитного поля для повторного молниевым разряда принято аппроксимировать униполярным импульсом биекспоненциальной формы (рис. 1).

Такой импульс характеризуется тремя основными параметрами [3]:

- максимальное значение амплитуды: A_m ;
- длительность фронта: $T_\phi = T_{0,9} - T_{0,1}$;
- время до полуспада: $T_c = T_{0,5}$

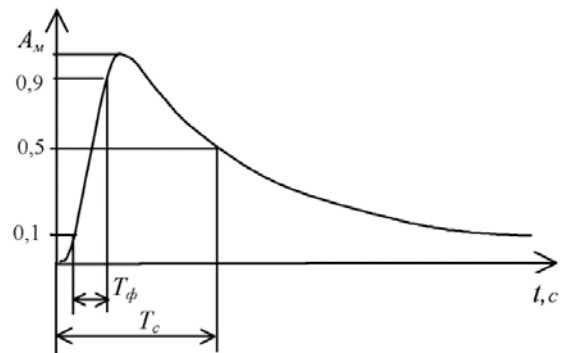


Рис. 1. Напряженность импульсного магнитного поля повторного молниевым разряда

Сокращенный формат записи временных параметров импульса записывается как T_ϕ/T_c . В авиационной приборостроении прибегают к испытаниям бортового оборудования на воздействие переходных процессов, создаваемых молнией, поскольку такое оборудование регулярно подвергается подобным воздействиям [4]. Параметры импульсов могут меняться в диапазоне от 6.4/16 мкс, до 50/500 мкс, в зависимости от выбранного стандарта, области применения и категории оборудования. Например, в [5] форма импульса магнитного поля аналогична форме импульса тока микросекундной импульсной помехи большой энергии в цепях электропитания для испытаний электротехнического и электронного оборудования бытового, коммерческого и промышленного назначения. Также, помимо описанных, существуют импульсы магнитного поля, обладающие другими формой и параметрами, в том числе и происходящие от других источников [6, 7].

Предполагаемая структура измерительного канала для такого импульса магнитного поля представлена на рис. 2. Он состоит из первичного и вторичного измерительных преобразователей (ПИП и ВИП), АЦП (аналогово-цифрового преобразователя) и пары микроконтроллеров (МК).

Задача первого микроконтроллера: собирать данные и передавать их второму. А задача второго МК: отправлять управляющие команды на МК1, принимать от него данные и отправлять их на персональный компьютер (ПК).

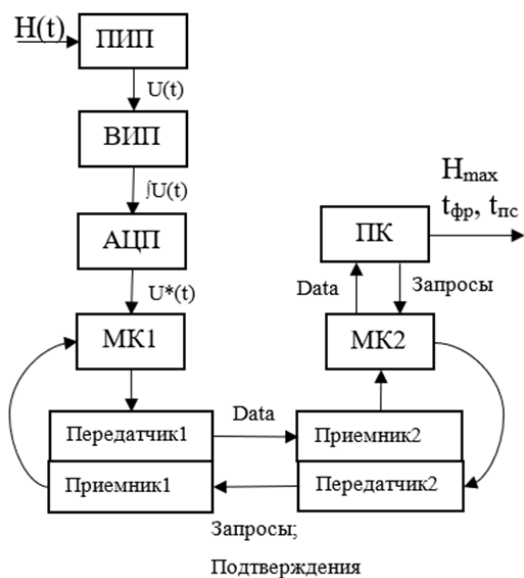


Рис. 2. Структура измерительного канала (параметры см. рис 1)

II. ПЕРВИЧНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Существует множество преобразователей магнитного поля, каждый из которых обладает своими достоинствами и недостатками. Для измерения параметров импульсного магнитного поля был выбран метод электромагнитной индукции, поскольку он обладает широким диапазоном измеряемых магнитных полей и позволяет измерить временные параметры высокоамплитудного импульса магнитного поля. Данный метод основан на возникновении ЭДС в витках катушки. Индукционный преобразователь магнитного поля представляет собой катушку индуктивности, в данном случае однослойную.

Индуктивность соленоида определяется следующей формулой [8]:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot W^2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot K_\alpha}{l}$$

где μ_0 – магнитная постоянная; W – количество витков; R – радиус витков катушки; l – длина катушки; K_α – табличный коэффициент, определяемый по отношению $l/(2R)$.



Рис. 3. Намотка катушки индукционного преобразователя

Индукционный преобразователь имеет следующие параметры:

Индуктивность: 500 мкГн.

Диаметр витков: 160 мм.

Длина намотки: 55 мм.

Число витков: 49.

Диаметр проводящей части намоточного провода: 1 мм.

Корпус для катушки смоделирован в программе КОМПАС-3D, итоговая модель изображена на рис. 4. Данная система автоматизированного проектирования была выбрана, поскольку она удобна для создания технических деталей, а также не имеет трудностей с получением лицензии.

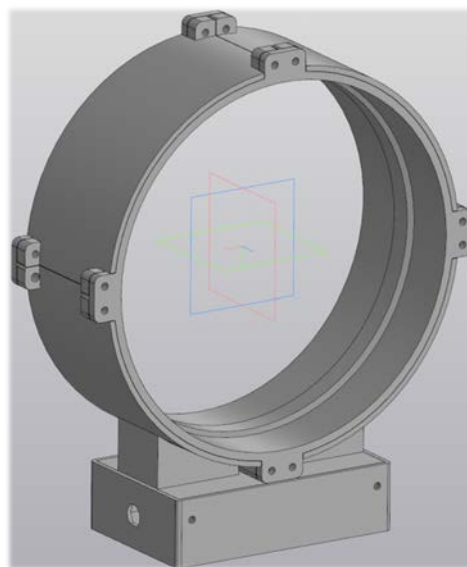


Рис. 4. Модель корпуса индукционного измерительного преобразователя

Затем корпус был напечатан на 3D-принтере из ABS пластика, и экранирован при помощи металлизированного покрытия для защиты от электромагнитных помех, как можно увидеть на рис. 5.



Рис. 5. Экранированный измерительный преобразователь магнитного поля

III. ВТОРИЧНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Поскольку исследуемый сигнал обладает крутым фронтом и длительным спадом, его интегрирование простыми RL и RC преобразователями неизбежно приводит к искажениям. Этот недостаток можно компенсировать проведением двух измерительных процедур с поочередным подключением RC и RL интеграторов. Однако проведение двух последовательных экспериментов вносит

дополнительную погрешность в результаты измерений и усложняет измерительный эксперимент.

Поэтому была разработана электрическая схема, реализующая необходимое преобразование (рис. 6). Она состоит из интегратора и сумматора на операционных усилителях. Поскольку сигнал на выходе интегратора инвертирован, была выбрана схема параллельного сумматора. А подстроечные резисторы позволят подобрать коэффициенты уравнения при настройке схемы.

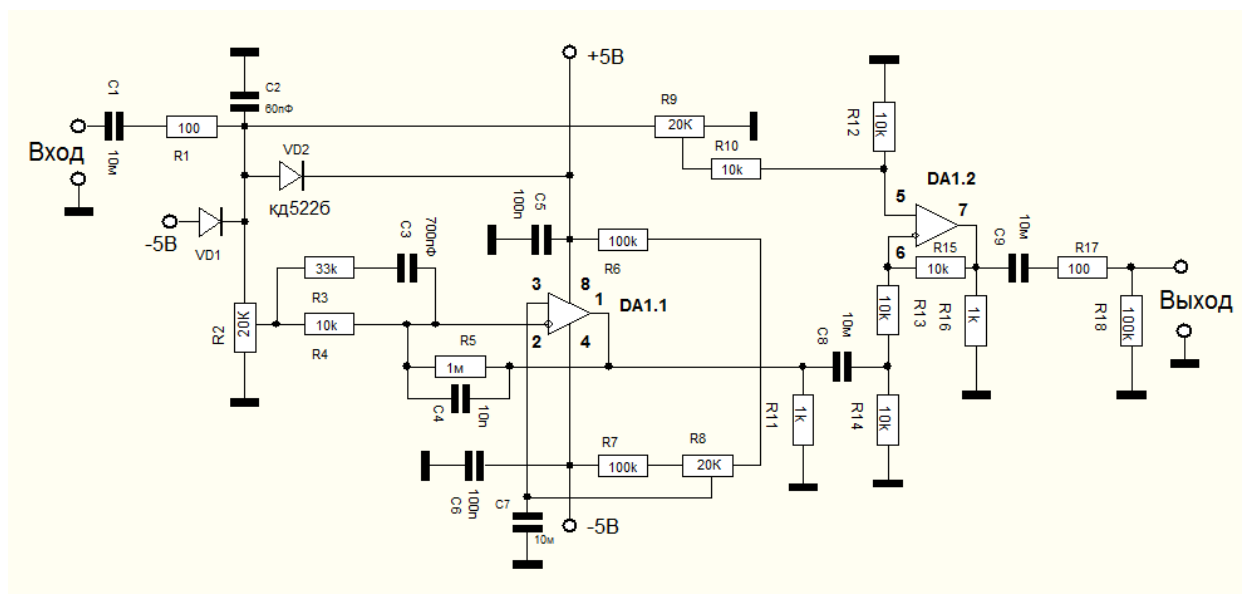


Рис. 6. Электрическая схема вторичного измерительного преобразователя

На плате реализована гальваническая развязка питания. А интегратор и сумматор выполнены на двухканальном операционном усилителе AD8056 с полосой пропускания 300 МГц.

Требования, предъявляемые к печатной плате:

- Расположение всех элементов на одной стороне для обеспечения удобного доступа к ним и их замены в случае необходимости после проведения эксперимента.
- Наличие достаточного пространства для размещения радиатора гальванической развязки.

К среде для трассировки печатных плат требованием была работа с распространенными форматами файлов трассировки, в том числе *.gbr. Спроектированная в программе KiCad печатная плата без элементов представлена на рис. 7.

Выполнение печатной платы предполагается сторонней организацией, которой потребуются файлы соответствующего формата.

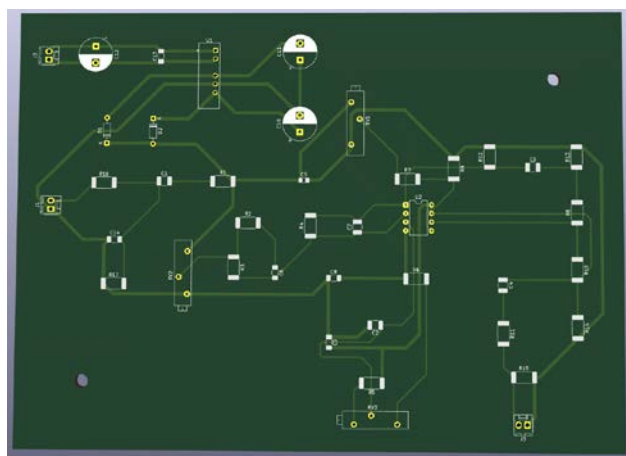


Рис. 7. Печатная плата вторичного измерительного преобразователя

IV. АЦП

После вторичного преобразования следует оцифровка сигнала для дальнейшего хранения и обработки данных. Чтобы определить частоту дискретизации необходимо рассмотреть спектр сигнала.

Спектр измеряемого сигнала является монотонно убывающей функцией, стремящейся к нулю, как показано на рис. 8. Предположим, что допустимый уровень отсекаемого спектра сигнала 0.001% от максимального значения. Наиболее чувствительной частью функции к отсекаемому высокочастотному спектру является фронт измеряемого сигнала.

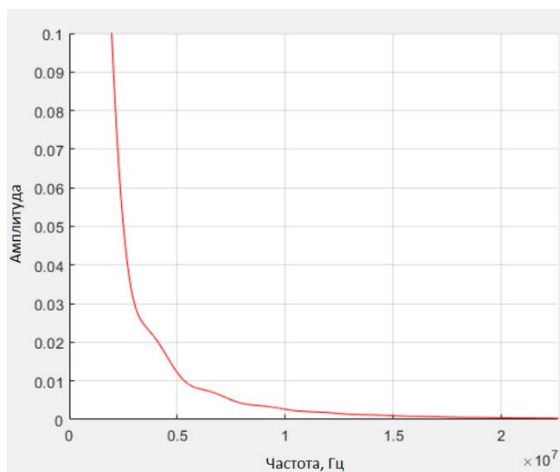


Рис. 8. Спектр измеряемого сигнала

Для определения значащей верхней частоты в сигнале отсечем часть с меньшей амплитудой. После отсечения спектра по уровню 0.0008% от максимального значения наибольшей частотой становится 9640 кГц. Соответственно по теореме Котельникова необходимая частота опроса АЦП составляет 19.38 МГц. При частоте дискретизации в 20 МГц зафиксированный фронт будет содержать 6 точек, что позволит с достаточной точностью определить его длительность. При необходимости уменьшить погрешность оцифровки сигнала можно прибегнуть к интерполяции значений.

Максимальная приведенная погрешность восстановленного сигнала при этом составила 1.3%, а среднеквадратическая к уровню сигнала – 0,008%. На измерение временных параметров это не оказывает значительного воздействия, поскольку наибольшее отклонение произошло на отрезке сигнала до точки начала отсчета времени фронта. Погрешности определения амплитудно-временных параметров составляют: 0.06% для амплитуды, 0.25% для длительности фронта и 0.09% для времени до полуспада.

АЦП с частотой 20 МГц и более существуют и широко распространены. 8-разрядный АЦП обеспечивает погрешности 0.06% для амплитуды, 0.8% для длительности фронта и 0.6% для времени до полуспада, если амплитуда сигнала близка к максимуму АЦП. Поскольку амплитуда измеряемых сигналов может значительно варьироваться, при снижении амплитуды на 1 порядок погрешность квантования приводит к увеличению погрешностей временных параметров до 5%, что оставляет очень малый запас для остальных элементов измерительного канала, при требовании к общей погрешности измерительного канала не превышать 10%.

Во избежание значительного усложнения схемы или повышенных требований к ручной настройке вторичного преобразователя был выбран 10-разрядный АЦП, что в последнем обозначенном случае привело к погрешностям в 1.6% для длительности фронта и 2.3% для времени до полуспада.

АЦП с данной частотой дискретизации и достаточной разрядностью широко распространены, например AD9203 (10 бит, максимальная частота преобразования 40 МГц).

V. МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ

Некоторые микроконтроллеры способны работать с вышеописанными частотами, например, nRF52832 или Teensy 4.1. Последний был выбран в качестве основного микроконтроллера, отвечающего за сбор данных. Он имеет возможность работы с частотой тактирования процессора в 1ГГц для быстрой обработки команд и встроенных таймеров с частотой 150МГц для генерации тактового сигнала АЦП и внутренних прерываний.

Микроконтроллером для приема измерительных данных был выбран ESP32-S3-Nano, ввиду пониженных требований к нему, а также в целях снижения общей стоимости системы. Он обладает достаточным для решаемой задачи объемом оперативной памяти, а также значительно повышенным быстродействием, в сравнении с распространенными моделями из того же ценового сегмента.

Оба микроконтроллера поддерживают программирование на языке C, что облегчает построение системы.

VI. КАНАЛ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Существует много способов передачи измерительной информации: проводные: коаксиальный кабель, витая пара, оптоволокно; беспроводные: радиоканал (Wi-Fi, Bluetooth), инфракрасный канал (ИК-канал), Li-Fi и другие. При измерении импульсного магнитного поля высокой амплитуды в проводах и радиоканале будут наводиться серьезные помехи, следовательно, оптимальным решением будут оптические методы передачи. Для уменьшения габаритных размеров и общей громоздкости системы был выбран инфракрасный канал передачи данных.

Блок передачи данных представляет из себя два набора из светодиодных передатчиков, фотодетектирующих приемников, которые подключены к контроллерам. Вторая пара приемник-передатчик нужна для отправки на первый контроллер запросов на повторную отправку данных в случае ошибки передачи или подтверждений об успешной передаче данных.

Также выбран протокол передачи данных NEC Infrared Transmission Protocol основанный на кодировании логических уровней длиной паузы (2,25 мс – 1; 1,12 мс – 0), между которыми приходит импульс длиной 560 мкс [9].

Макет для проверки работоспособности инфракрасного канала передачи данных собран на безопасных макетных платах, как показано на рис. 9. К первому контроллеру подключен АЦП и пара приемник-передатчик, а ко второму пара приемник-передатчик и модуль для подключения карты памяти, поскольку ESP32-S3-Nano не имеет достаточно постоянной памяти для хранения большого массива измерительных данных.

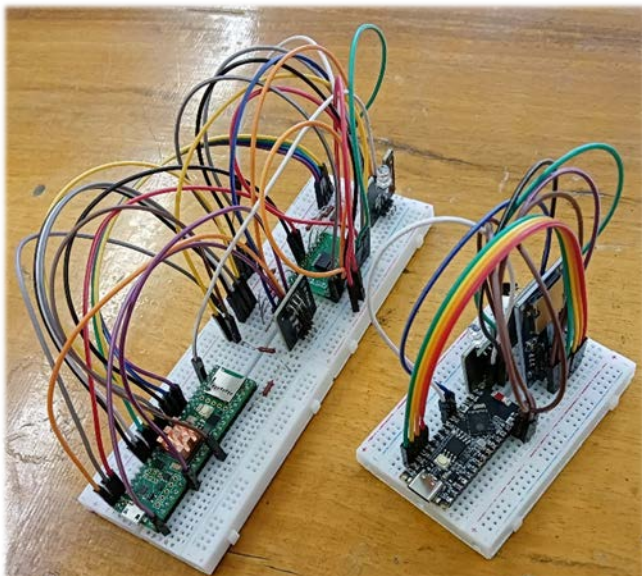


Рис. 9. Тестовое подключение АЦП, микроконтроллеров и инфракрасного канала передачи данных

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Собран индукционный преобразователь магнитного поля, разработана плата вторичного измерительного преобразователя, выбран подходящий АЦП, подобраны контроллеры для сбора и передачи измерительных данных, собран макет канала передачи данных.

Для завершения измерительного канала необходимо изготовить печатную плату вторичного преобразователя и печатные платы для подключения элементов к микроконтроллерам, а также изготовить корпуса для вышеперечисленных позиций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Защита электронных устройств от импульсных помех большой энергии / В. Скворцов, В. Суворов // Силовая Электроника, № 2, 2013, с. 16-20.
- [2] Лившиц М.Л., Шишялковский Б.И. Лакокрасочные материалы: Справ. пособие. 2-е изд. СПб.: Химия, 1996. 264 с.
- [3] Балок Н.В., Орлов С.Д., Оленевский В.В., Стежок Д.Н. Требования устойчивости и стойкости технических систем к воздействию импульсных электромагнитных полей «Технологии электромагнитной совместимости». 2022, № 2 (81), с. 3–19.
- [4] Yaroslav A. Tyarkin, Natalia V. Romantsova, Sergey V. Romantsov, "Development of a Pulse Magnetic Field Meter", 2024 XXVII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), pp.295-298, 2024. DOI: 10.1109/SCM62608.2024.10554116
- [5] Техника высоких напряжений // Под ред. М.В. Костенко. М.: «Высшая школа», 1973.
- [6] Немченко Ю.С., Шаламов С.П. Индукционный преобразователь импульсного магнитного поля молнии // Вестник НТУ «ХПИ». 2015. № 20 (1129). С. 99–108.
- [7] ГОСТР МЭК 62305-4-2016. Защита от молнии. Защита электрических и электронных систем внутри зданий и сооружений. Москва Стандартинформ. 2016.
- [8] ГОСТ IEC 61000-4-5-2017. Электромагнитная совместимость. Методы испытаний и измерений. Испытание на устойчивость к выбросу напряжения. Межгосударственный стандарт. 2018.
- [9] Калантаров П.Л. Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей, Энергоатомиздат, 1986. 488 с.
- [10] Description of NEC IR protocol [electronic resource] URL: <https://radioham.ru/nec/> (accessed on 20.05.2024).