4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса (технические науки)

doi:10.18286/1816-4501-2026-3-265-272
УДК 631.524.8:531.79

Проектирование схемы обратной связи с датчиком тока CTG0500-FF

А. С. Угловский[1]✉, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрификация»
А. А. Белов[2], доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая электротехника»
[1]ФГБОУ ВО «Ярославский государственный аграрный университет»
150042, г. Ярославль, Тутаевское ш., д. 58.
✉a.uglovskii@yarcx.ru.
[2]Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

Резюме. В современных агротехнических системах точный контроль параметров воздействия на растения является ключевым фактором для повышения эффективности и безопасности обработки. Измерение тока, протекающего через растение в момент воздействия, позволяет не только зафиксировать факт контакта электрода с растением, но и определить его уничтожение. Спроектирована и исследована схема обратной связи с датчиком тока CTG0500-FF. Схема является частью системы уничтожения сорных растений, работающей на принципе высоковольтного электрического разряда.

В статье подробно рассматривается принцип работы датчика тока CTG0500-FF, который основан на бесконтактном измерении тока с гальванической развязкой, что критически важно при работе с высоковольтными цепями. Для обработки слабого выходного сигнала датчика разработана аналоговая схема с операционным усилителем OP07CP, обеспечивающая усиление сигнала с коэффициентом 2. Для питания схемы используется DC/DC преобразователь MGJ2D151505SC. Он блокирует высоковольтные помехи, не давая им проникнуть в цепь управления. Для подавления помех применены конденсаторы различной емкости; также выполнено проектирование печатной платы с оптимальным расположением компонентов для минимизации паразитных емкостей и индуктивностей, что существенно повышает качество сигнала и устойчивость работы схемы. Проведен анализ спектральной плотности шума (PSD), который подтвердил эффективность примененных фильтров, а также частотный анализ (АЧХ и ФЧХ), свидетельствующий о высоком запасе по фазе и стабильности системы.Для безопасной работы в контуре 15 кВ в качестве первичного проводника применен специализированный высоковольтный силиконовый провод марки ПСВм 25 кВ (внешний диаметр 7,0 мм, сечение жилы 1,0 мм^2), пропускаемый непосредственно через измерительное окно датчика. Параметры изоляции и сечения провода обеспечивают электрическую прочность для безопасной работы контура 15 кВ.

Ключевые слова: датчик тока, АЧХ, ФЧХ, операционный усилитель, печатная плата
Для цитирования: Угловский А. С., Белов А. А. Проектирование схемы обратной связи с датчиком тока CTG0500-FF // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 3 (75). С. 265-272. doi:10.18286/1816-4501-2026-3-265-272

Design of a feedback circuit with the CTG0500-FF current sensor

A. S. Uglovskii[1]✉**, A. A. Belov**[2]
[1]FSBEI HE Yaroslavl State Agrarian University
150042, Yaroslavl, Tutaevskoe Highway, 58.
✉a.uglovskii@yarcx.ru.
[2]Moscow Aviation Institute (national research university)
125993, Moscow, Volokolamskoe Highway, 4

Abstract. Precise control of the impact parameters on plants is a key factor in increasing the efficiency and safety of treatment in modern agrotechnical systems. Measuring the current flowing through the plant at the moment of the impact not only allows to detect electrode contact but also to determine its destruction. A feedback circuit for the CTG0500-FF current sensor has been designed and tested. The circuit is part of a weed control system operating on the principle of high-voltage electrical discharge. This article examines in detail the operating principle of the CTG0500-FF current sensor, which is based on contactless current measurement with galvanic isolation, which is critical when working with high-voltage circuits. To process the sensor's weak output signal, an analog circuit with an OP07CP operational amplifier was developed, providing a signal gain of 2. An MGJ2D151505SC DC/DC converter is used to power the circuit. It blocks high-voltage interference, preventing it from penetrating the control circuit. Capacitors of varying capacitance are used to suppress interference; a printed circuit board with an appropriate component layout was also designed to minimize parasitic capacitance and

inductance. This significantly improves signal quality and circuit stability. A noise spectral density (PSD) analysis confirmed the effectiveness of the filters used, as well as a frequency analysis (frequency response and phase response), demonstrating a high phase margin and system stability. To ensure safe operation in a 15 kV circuit, a specialized high-voltage silicone wire, grade PSVM 25 kV (outer diameter 7.0 mm, core cross-section 1.0 mm²), was used as the primary conductor, passed directly through the sensor's measurement window. The insulation parameters and wire cross-section ensure the electrical strength for safe operation in a 15 kV circuit.

Keywords: current sensor, frequency response, phase response, operational amplifier, printed circuit board.
For citation: Uglovskii A.S., Belov A.A. Design of a feedback circuit with the CTG0500-FF current sensor // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.3 (75): 265-272 doi:10.18286/1816-4501-2026-3-265-272

Введение

Высоковольтные электрические разряды - один из новых перспективных методов борьбы с сорными растениями [1]. В отличие от химических средств этот способ уничтожает растительность, не загрязняя окружающую среду, и повышает общую безопасность производства [2]. Использование высоковольтных разрядов в плане контроля и надёжности напрямую зависит от точного измерения и анализа электрических параметров с использованием интеллектуальных систем [3, 4]. Исследования воздействия электрических полей, электрических токов и импульсных электрических полей на растения и другие биологические объекты представлены в работах [5, 6]. Основным параметром является ток, протекающий через растение при воздействии высоковольтными импульсами [7, 8].

Измерение тока в высоковольтных цепях сопряжено с рядом технических сложностей, включая необходимость гальванической развязки, защиту от помех и обеспечение безопасности оборудования и оператора [9]. Для решения этих задач применяются бесконтактные датчики тока, такие как CTG0500-FF [10].

В данной статье рассматривается проектирование схемы обратной связи с использованием датчика тока CTG0500-FF, предназначенной для контроля процесса уничтожения сорных растений. Рассматривается методика измерения разрядного тока через ток высоковольтного преобразователя.

Анализ существующей технологической базы и патентный поиск [11, 12] подтверждают актуальность предложенных в данной работе схемотехнических решений.

Реализация данной схемы в сочетании с цифровой обработкой данных на платформе Raspberry Pi дает возможность оперативного контроля и управления процессом уничтожения сорных растений, повышая эффективность и безопасность системы [13]. Предложенное решение поможет в разработке современных агротехнических устройств и подойдет для любых других задач, где нужно точно измерить ток с гальванической развязкой.

Цель исследования – проектирование и имитационное моделирование схемы аналоговой обработки сигнала датчика CTG0500-FF для измерения импульсных разрядных токов (до 150 А) в высоковольтной системе уничтожения сорных растений, обеспечивающей гальваническую развязку и согласование уровней сигналов с цифровой платформой управления на базе Raspberry Pi.

Материалы и методы

Исследования проводились в 2025 г. на базе лаборатории кафедры «Электрификация» в Ярославском ГАУ. Проектирование принципиальной электрической схемы и трассировка печатной платы выполнялись в среде автоматизированного проектирования KiCad.

Методика эксперимента учитывала тот факт, что сорное растение в электрической цепи представляет собой сложную динамическую нагрузку. При высоковольтном электроимпульсном воздействии характер электропроводных свойств растительных тканей резко меняется [14]. Пробой клеточных мембран приводит к нелинейному изменению параметров схемы замещения растения (его активного сопротивления и емкости) [15], что требует высокой скорости и точности регистрации разрядного тока для оценки степени повреждения сорного растения.

Обзор существующих методов измерения тока в силовых преобразователях [16] и сравнительный анализ измерительных датчиков [17] показывают, что использование традиционных контактных методов в высоковольтных агротехнических системах сопряжено с повышенным риском электрического пробоя, что существенно ограничивает их применение. Несмотря на широкое применение магнитных датчиков [18] и измерительных модулей на основе эффекта Холла [19], для безопасной работы в контуре 15 кВ оптимальным решением выступают бесконтактные трансформаторные датчики тока с обоснованными конструктивными параметрами магнитопровода [20].

Датчик тока в системе уничтожения сорных растений служит для контроля электрического тока, протекающего через растение в момент воздействия. С помощью его определяется факт контакта электрода с сорным растением и успешность его уничтожения.

При контакте с растением ток резко возрастает, а после уничтожения - снижается. Эти изменения фиксируются датчиком и передаются в систему управления (Raspberry Pi), которая на их основе принимает решение о необходимости повторного воздействия или перехода к следующему растению уже по решению технического зрения [21].

В высоковольтном источнике при уничтожении сорных растений электрическим разрядом необходимо контролировать ток, протекающий через разрядный промежуток. Разработка электрической

схемы на базе датчика тока CTG0500-FF необходима для проведения измерения тока в цепи преобразователя. Спроектированная авторами схема в программе Kicad показана на рисунке 1.

Выбор датчика тока CTG0500-FF с номинальным диапазоном до ±150 А обусловлен необходимостью фиксации высокочастотных импульсных токов разряда, возникающих в момент пробоя тканей сорных растений. Несмотря на то, что средний ток потребления в низковольтной цепи преобразователя составляет около 5 А, во вторичной (высоковольтной) цепи в моменты микросекундных искровых разрядов возникают значительные пиковые значения тока.

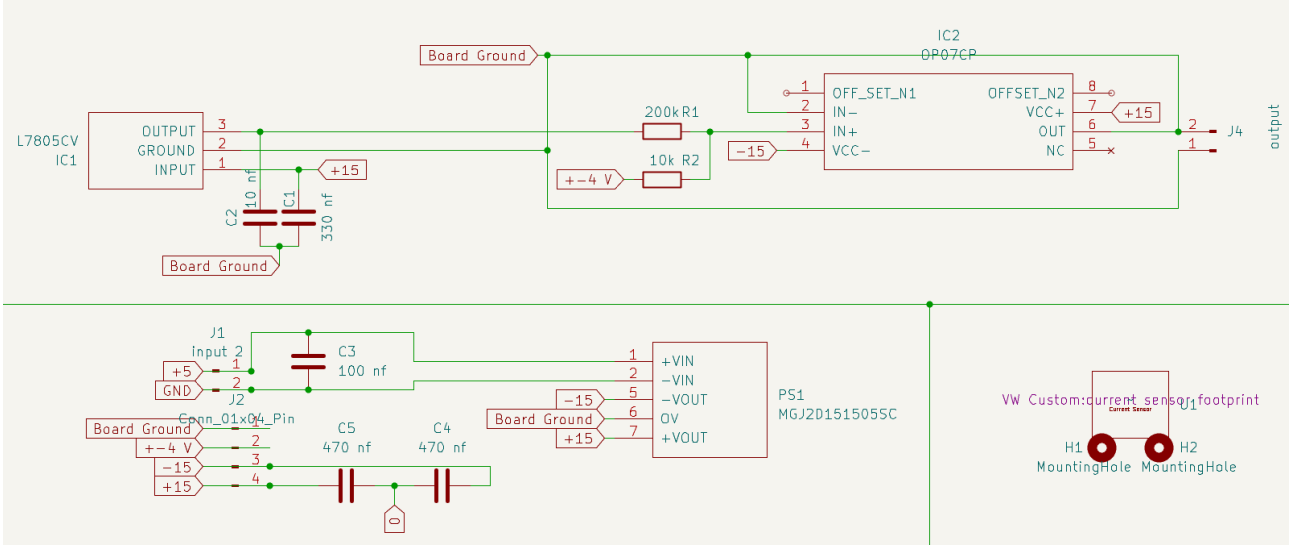


Рис. 1. Схема аналоговой обработки сигнала датчика тока CTG0500-FF

На рисунке 1 представлены следующие компоненты:

1) Конденсаторы для фильтрации помех в цепи питания (C5, C4 по 470 нФ).

Конденсаторы фильтрации C4 и C5 соединяются общей точкой с «аналоговой землей» (AGND) вторичного контура питания, что минимизирует синфазные помехи от работы DC/DC преобразователя.

2) Конденсатор для фильтрации помех в цепи сигнала (C2 – 0,01 мкФ).

3) Конденсатор для фильтрации помех в цепи питания (C3 – 100 нФ).

4) DC/DC преобразователь для питания операционного усилителя (MGJ2D151505SC:PS1).

5) Операционный усилитель для усиления сигнала датчика тока (OP07CP: IC2).

6) Резисторы для установки коэффициента усиления операционного усилителя (R3, R1, R2, R4 по 1 кОм).

7) Стабилизатор напряжения 5 В (L7805CV: IC1) для формирования прецизионного опорного напряжения измерительного каскада.

8) Конденсатор для фильтрации помех в цепи питания (C1 – 0.33 мкФ)

9) Посадочное место для датчика тока (U1: current sensor footprint).

Датчик тока CTG0500-FF (CT007A-FF) используется для измерения тока, протекающего через выводы высоковольтного преобразователя в процессе уничтожения сорного растения. Основные характеристики датчика:

1) Номинальный первичный ток: 50 А

2) Диапазон измерения тока: ±150 А

3) Напряжение питания: Ucc = 15 В

Расчет параметров схемы и диапазона выходного напряжения

Датчик тока CTG0500-FF имеет диапазон измерения импульсного тока ±150 А. Согласно технической документации, чувствительность датчика составляет S = 0,08 В/А. Следовательно, при максимальном токе ±150 А выходное напряжение датчика достигает $U_{дат}$ =±12 В. Поскольку аналого-цифровой преобразователь MCP3008, работающий в связке с Raspberry Pi, допускает входное напряжение только в положительном диапазоне (от 0 до 5 В), прямая подача биполярного сигнала недопустима. Для согласования уровней схема на ОУ OP07CP сконфигурирована как неинвертирующий сумматор, работающий в режиме буферного повторителя с коэффициентом усиления K = 1. Номиналы резисторов заданы следующими: R1 = 200 кОм, R2 = 10 кОм. На резистор R2 подается опорное напряжение $U_{оп}$ = 5 В со стабилизатора L7805.

Выходное напряжение $U_{вых}$ рассчитывается по формуле:

$$U_{вых} = U_{дат} \cdot \frac{R_2}{R_1+R_2} + U_{оп} \cdot \frac{R_1}{R_1+R_2}, \quad (1)$$

При токе +150 А ($U_{дат}$ = +12 В) выходное напряжение составит $U_{вых}$ ≈ 5,33 В.

При токе 0 А ($U_{дат}$ = 0 В) выходное напряжение составит $U_{вых}$ ≈ 4,76 В (уровень логического нуля).

При токе -150 А ($U_{дат}$ = -12 В) выходное напряжение составит $U_{вых}$ ≈ 4,19 В. Данный диапазон соответствует рабочим характеристикам АЦП MCP3008 и исключает подачу отрицательного напряжения на порты Raspberry Pi.

1. Измерение тока датчиком тока (U1 - Current Sensor Footprint)

Первым элементом схемы является трансформаторный датчик тока (U1), который физически расположен в цепи, где протекает ток уничтожения сорного растения. Датчик преобразует измеренный ток в пропорциональное напряжение. Данный датчик имеет измерительное окно (токовый зазор), через которое пропускается высоковольтный провод. Важно отметить, что, согласно технической документации, собственное напряжение изоляции корпуса датчика составляет 2,5 кВ, поэтому для безопасной работы в контуре 15 кВ первичный проводник выполнен из специализированного высоковольтного кабеля с усиленной изоляцией. Это в комплексе с бесконтактным методом измерения полностью исключает вероятность пробоя на низковольтную часть измерительной схемы при пиковых токах до 50 А.

При проектировании высоковольтной цепи особое внимание было уделено подбору первичного проводника, проходящего через измерительное окно датчика CTG0500-FF. Выбор силиконового провода марки ПСВм 25 кВ обусловлен сочетанием высокой электрической прочности и механических свойств.

2. Обеспечение питания (PS1 – MGJ2D151505SC)

Поскольку датчик тока и операционный усилитель работают с низковольтным сигналом, но находятся вблизи высоковольтной цепи, для их питания используется DC/DC преобразователь MGJ2D151505SC (PS1), который питается от стабилизированного источника напряжения 5 В, используемого для питания цифровой части системы – Raspberry Pi. Питание подаётся на вход преобразователя (+VIN, −VIN), обеспечивая формирование гальванически развязанного двухполярного напряжения ±15 В.

Входное питание (+VIN, -VIN): Преобразователь подключается к источнику питания системы.

Выходное питание (+VOUT, -VOUT): Преобразует входное напряжение в ±15 В, которое используется для питания операционного усилителя OP07CP.

3. Фильтрация питания (C3, C4, C5)

Для обеспечения стабильной работы DC/DC преобразователя и операционного усилителя используются фильтрующие конденсаторы C3 (100 нФ), C4 (470 нФ) и C5 (470 нФ).

4. Усиление и смещение сигнала (IC2 – OP07CP)

Аналоговый сигнал с датчика тока, пропорциональный измеряемой величине, поступает на операционный усилитель OP07CP (IC2). Данный каскад реализован по схеме масштабирующего усилителя со смещением уровня. Он обеспечивает усиление слабого сигнала и его сдвиг в положительный диапазон напряжений. Результирующий сигнал снимается с выхода операционного усилителя (вывод 6) и передается на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) микрокомпьютера Raspberry Pi для дальнейшей программной обработки.

5. Стабилизация напряжения (IC1 – L7805CV)

Стабилизатор L7805CV (IC1) в схеме (рис. 1) используется в качестве источника опорного напряжения 5 В, необходимого для смещения сигнала датчика в положительную область. Питание операционного усилителя OP07CP осуществляется от источника ±15 В (DC/DC преобразователь), что обеспечивает работу ОУ в линейном режиме без ограничений по выходному напряжению.

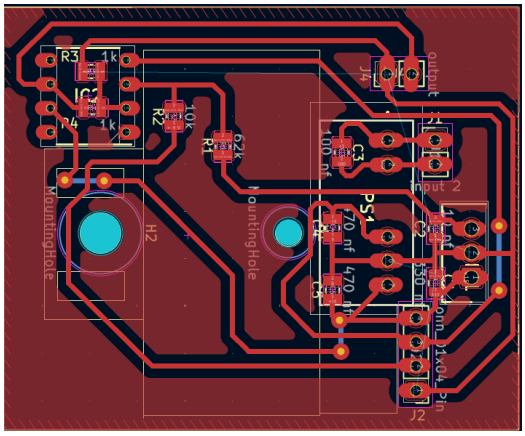


Рис. 2. Печатная плата устройства

На представленном изображении показана печатная плата спроектированной схемы датчика тока (рис. 2). При проектировании печатной платы были учтены следующие аспекты для обеспечения оптимальной работы и минимизации влияния помех. На плате реализовано физическое разделение схемы на питающую и измерительную части. В левой части платы сгруппированы компоненты питания (DC/DC преобразователь PS1, разъемы J1 и J2), а в правой нижней части, на максимальном удалении от источника импульсных помех, расположен операционный усилитель IC2 с обвязкой (R1–R4).

Результаты

Влияние фильтрующих конденсаторов на шум в цепи питания DC/DC-преобразователя оценили с помощью симуляции. Ее результаты показаны на графиках спектральной плотности мощности шума (PSD). На графиках (рис. 3) показано сравнение PSD до и после установки фильтрующих конденсаторов C4 и C5 (470 нФ каждый), подключенных параллельно на входе преобразователя.

График ФЧХ (рис. 4) для разомкнутого контура приближается к -90 градусам на высоких частотах. Это говорит о том, что проектируемое устройство имеет только один доминирующий полюс, и фаза не успевает достичь -180 градусов до того, как коэффициент усиления станет очень мал.

В таком случае можно утверждать, что устройство обладает высоким запасом по фазе, так как даже на частотах, близких к частоте единичного усиления, сдвиг фазы остается значительно выше критического порога в -180 градусов.

Результаты моделирования первичного разрядного тока и его последующего измерения датчиком представлены на рисунках 5 и 6.

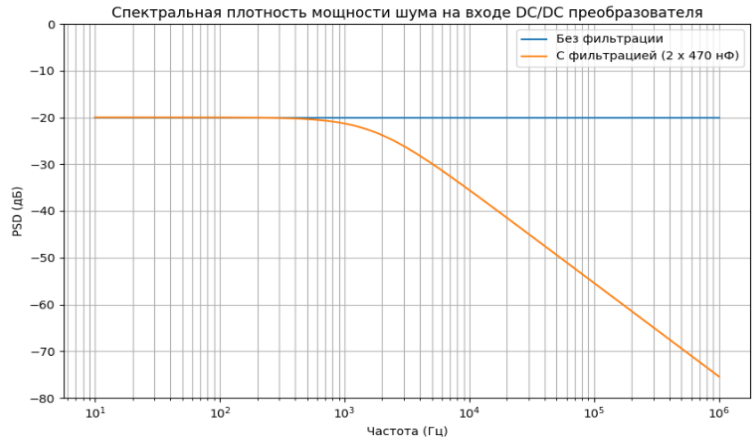


Рис. 3. Спектральная плотность шума на входе DC/DC преобразователя

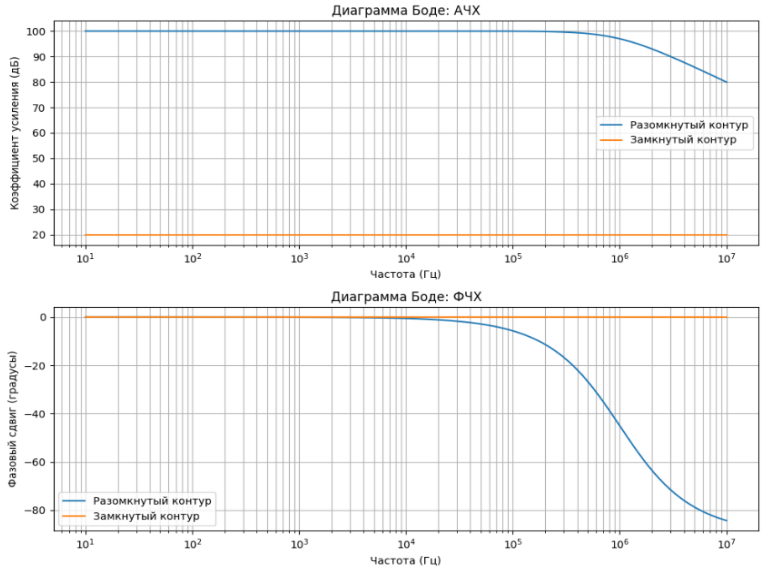


Рис. 4. Диаграмма АЧХ и ФЧХ устройства

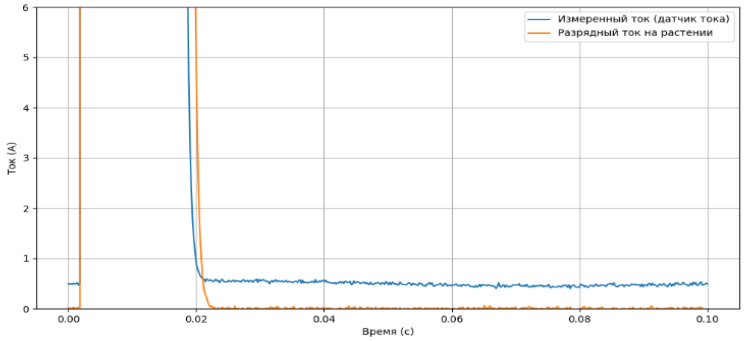


Рис. 5. Временная диаграмма первичного разрядного тока

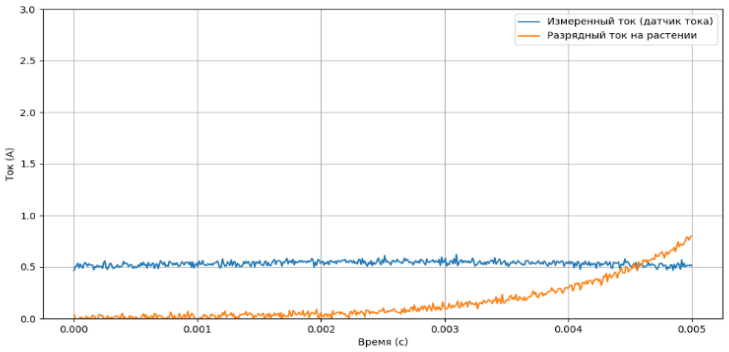


Рис. 6. График измеренного тока с учетом зоны нечувствительности датчика

Графики (рис. 5 и 6) отражают временную форму первичного разрядного тока в высоковольтной цепи и получены на основе имитационного моделирования процесса электрического пробоя через эквивалентную нагрузку (ткань растения). Представленные зависимости являются входными данными для измерительного устройства и не зависят от параметров аналоговой схемы согласования, так как последняя выполняет функцию линейного масштабирования и статического смещения уровня сигнала.

Разные масштабы времени на графиках использованы для того, чтобы отдельно рассмотреть общую длительность процесса и его начальную фазу. Рисунок 5 показывает весь импульс целиком, а рисунок 6 – крупным планом первые микросекунды электрического пробоя. Ограничение пика тока на рисунке 5 связано с физическим пределом самого датчика (±150 А). Данный срез наглядно показывает, что разработанная схема защиты работает правильно и надежно защищает входы АЦП от опасных бросков тока.

Из графика (рис. 6) видно, что ток, протекающий через растение, нарастает плавно, что связано с комплексным характером сопротивления биологического объекта (наличием емкостной составляющей тканей). На рисунке 6 наблюдается «мертвая зона» при токах до 0,8 А. Это обусловлено порогом чувствительности датчика тока на эффекте Холла и уровнем шумов квантования АЦП при выбранном широком диапазоне измерения ±150 А. Для задач электроимпульсного уничтожения сорных растений, где рабочие токи разряда составляют десятки ампер, данная погрешность в области малых токов (менее 1 А) не является критической и не влияет на общую достоверность оценки энергетического воздействия. Под достоверностью оценки энергетического воздействия понимается точность вычисления суммарного количества энергии ($E = \int U(t) \cdot I(t) dt$), выделяющегося в ткани растения за период разряда. Поскольку основной объем энергии передается в моменты пиковых токов (десятки ампер), погрешность измерений в подпороговой области (менее 1 А) вносит пренебрежимо малый вклад в итоговый интеграл и не искажает общую физическую картину эффективности обработки.

Спроектированная схема обратной связи решает критическую проблему бесконтактного измерения токов в высоковольтных агротехнических установках. В отличие от традиционных шунтов, применение трансформаторного датчика

CTG0500-FF с дополнительной фторопластовой изоляцией провода гарантирует отсутствие пробоя 15 кВ на низковольтные цепи управления. Анализ АЧХ и ФЧХ (рис. 4) подтверждает устойчивость контура обратной связи (запас по фазе > 60°), что исключает автоколебания ОУ при работе с емкостной нагрузкой, которой является сорное растение.

Особенностью предложенного решения является применение масштабирующего усилителя со смещением уровня на базе прецизионного ОУ OP07CP. Экспериментальные данные (рис. 5 и 6) доказывают, что схема корректно масштабирует биполярный сигнал датчика (от -12 В до +12 В) в исключительно положительный диапазон (от 2,6 В до 5 В). Это устраняет главную уязвимость подобных систем – риск выгорания низковольтных портов микрокомпьютера Raspberry Pi при регистрации обратных выбросов тока.

Согласование уровней напряжения позволило безопасно интегрировать датчик с платформой Raspberry Pi, создав надежный инструмент для фиксации факта пробоя и оценки степени повреждения растительной ткани в реальном времени.

Обсуждение

Полученные результаты подтверждают целесообразность применения бесконтактного измерения разрядного тока в высоковольтной системе электроимпульсного уничтожения сорных растений. В работах, посвященных измерению тока в силовой электронике и сравнительному анализу датчиков [9, 10, 16, 17], ключевыми требованиями к измерительному каналу рассматриваются электрическая развязка, достаточное быстродействие и помехоустойчивость. В разработанном тракте эти требования реализуются за счет бесконтактного датчика CTG0500-FF, гальванически развязанного DC/DC-преобразователя и фильтрации питающих и сигнальных цепей. Результаты моделирования PSD, АЧХ и ФЧХ показывают снижение высокочастотной составляющей помех после введения фильтрующих элементов и устойчивую работу аналогового тракта в исследованном диапазоне частот.

Динамика разрядного тока согласуется с ранее описанным нелинейным изменением электропроводных свойств растительных тканей при электроимпульсном повреждении и изменением параметров их схемы

тельного контура. Дальнейшая программная обработка сигналов с помощью контроллера Raspberry Pi и аналого-цифрового преобразователя MCP3008 обеспечит системе возможность контроля параметров электрического воздействия в режиме реального времени.

Литература

1.Yudaev I. V., Daus Yu. V., Sharov I. V. Electropulse Weed Control as an Element of Organic Farming in Sustainable Agriculture // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2025. Vol. 61. No. 6. P. 921–931. doi: 10.3103/S1068375525701005

2. Шинделов А. В., Иванов Н. М. Инженерно-экологическое обеспечение борьбы с сорной растительностью // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2019. Т. 13. № 3. С. 18-23. doi: 10.22314/2073-7599-2019-13-3-18-23

замещения [14, 15]. Вместе с тем представленные зависимости получены имитационным моделированием, поэтому количественные критерии степени повреждения растения требуют последующей экспериментальной верификации на реальных биологических объектах.

Таким образом, по результатам исследования можно сформулировать следующие основные выводы: бесконтактная регистрация разрядного тока с гальванической развязкой соответствует требованиям высоковольтной агротехнической установки; фильтрация и аналоговое согласование повышают помехоустойчивость измерительного канала и обеспечивают подготовку сигнала к цифровой обработке; временная форма разрядного тока может использоваться как диагностический параметр процесса электрического воздействия.

Заключение

В результате проведённых исследований методом имитационного моделирования была обоснована и спроектирована схема измерительного тракта на базе датчика тока на эффекте Холла CTG0500-FF для системы электроимпульсного уничтожения сорных растений. Схема согласования уровней, реализованная на базе операционного усилителя в режиме буферного повторителя, настроена таким образом, что выходное напряжение смещено в безопасную положительную область от 4,2 до 5,3 В при максимальном импульсном токе ±150 А. учитывая паспортную чувствительность датчика 0,08 В/А, что полностью исключает риск повреждения АЦП отрицательным напряжением.

Для подавления высокочастотных помех в цепях питания аналогового тракта использованы керамические конденсаторы C4 и C5 (470 нФ). Их общая точка подключена к изолированной аналоговой земле вторичного каскада питания. Такое решение предотвращает проникновение синфазных помех из высоковольтного контура в цифровую часть системы через общую шину питания.

Спроектированная схема обратной связи на базе датчика CTG0500-FF позволяет регистрировать динамику разрядного тока. Полученные на основе имитационного моделирования графики зависимости тока от времени подтвердили адекватность предложенного подхода и высокое быстродействие измери

3. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур: структура данных и методы искусственного интеллекта / В. К. Каличкин, К. Ю. Максимович, О. А. Алещенко и др. // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2025. Т. 19. № 2. С. 33-44. doi: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-33-44

4. Мирзаев М. А. Разработка алгоритма роботизированного устройства точного внесения средств защиты растений // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. Т. 16. № 3. С. 74-80. doi: 10.22314/2073-7599-2022-16-3-74-80

5. Diprose M. F., Benson F. A., Willis A. J. The effect of externally applied electrostatic fields, microwave radiation and electric currents on plants and other organisms, with special reference to weed control // The Botanical Review. 1984. Vol. 50. No. 2. P. 171-223. doi: 10.1007/BF02862633

6. Ghoshal G. Comprehensive review on pulsed electric field in food preservation: gaps in current studies for potential future research // Heliyon. 2023. Vol. 9. No. 6. P. e17532. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17532

7. Ценч Ю. С., Годлевская Е. В. Математическое моделирование как инструмент проектирования сельскохозяйственных машин и агрегатов // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2023. Т. 17. № 2. С. 4–12. doi: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-4-12

8. AE—Automation and Emerging Technologies: Robotic Weed Control using Machine Vision / J. Blasco, N. Aleixos, J. M. Roger et al. // Biosystems Engineering. 2002. Vol. 83. № 2. P. 149-157. doi: 10.1006/bioe.2002.0109

9. Patel A. M., Ferdowsi M. Advanced Current Sensing Techniques for Power Electronic Converters // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2007. P. 112-117. doi: 10.1109/VPPC.2007.4544109

10. Ripka P. Electric current sensors: a review // Measurement Science and Technology. 2010. Vol. 21. No. 11. P. 112001. doi: 10.1088/0957-0233/21/11/112001

11. Патент № 2719794 C2 Российская Федерация, МПК G01R 15/18, G01R 19/00. Датчик тока и устройство для измерения электрического тока : № 2016144165 : заявл. 10.11.2016 : опубл. 23.04.2020 / Л. Юранкар; заявитель Шнейдер электрик эндюстри САС. – EDN ADVALT.

12. Свидетельство о государственной регистрации топологии микросхемы № 2016630163 Российская Федерация. Датчик тока: № 2016630089: заявл. 25.07.2016 : опубл. 24.11.2016 / А. Б. Грабов, В. И. Суханов, Н. Н. Суханова ; заявитель Акционерное общество «Научно-производственное объединение измерительной техники». – EDN TIECSO.

13. Slaughter D. C., Giles D. K., Downey D. Autonomous robotic weed control systems: A review // Computers and Electronics in Agriculture. 2008. Vol. 61. No. 1. P. 63-78. doi: 10.1016/j.compag.2007.05.008

14. Юдаев И. В., Даус Ю. В. Характер изменения электропроводных свойств растительных тканей сорняков при электроимпульсном повреждении // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2018. № 3(199). С. 134-141. doi: 10.17213/0321-2653-2018-3-134-141.

15. Юдаев И. В. Анализ изменения параметров схемы замещения растительной ткани сорного растения при электроимпульсном воздействии // Электронная обработка материалов. 2018. Т. 54. № 2. С. 82-88.

16. Current sensing techniques: A review / S. Ziegler, R. C. Woodward, H. H. C. Iu, et al. // IEEE Sensors Journal. 2009. Vol. 9. No. 4. P. 354-376. doi: 10.1109/JSEN.2009.2013914

17. Adamo F., Attivissimo F., Di Nisio A. Comparison of current sensors for power consumption assessment of wireless sensors network nodes // IEEE International Workshop on Measurement Networks. 2017. P. 54-59. doi: 10.1109/IWMN.2017.8050361.

18. Lenz J., Edelstein A. S. Magnetic sensors and their applications // IEEE Sensors Journal. 2006. Vol. 6. No. 3. P. 631-649. doi: 10.1109/JSEN.2006.874493.

19. Realization and optimization of bus bar current transducers based on Hall effect sensors / M. Blagojevic, U. Jovanovic, I. Jovanovic et al. // Measurement Science and Technology. 2016. Vol. 27. No. 6. P. 065102. doi: 10.1088/0957-0233/27/6/065102.

20. Клименко К. А. Расчет конструктивных параметров трансформаторного датчика тока с короткозамкнутым кольцом // Естественные и технические науки. 2014. № 7(75). С. 82-84. EDN SNWNKD.

21. Угловский А. С., Семеренко Н. Ю. Мобильная система для уничтожения сорных растений с использованием высоковольтного разряда и обратной связи на основе датчика тока // Агротехника и энергообеспечение. 2024. № 4(45). С. 26-33. EDN SACMNZ.

References

1. Yudaev I. V., Daus Yu. V., Sharov I. V. Electropulse Weed Control as an Element of Organic Farming in Sustainable Agriculture // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2025. Vol. 61.No. 6. P. 921–931. doi: 10.3103/S1068375525701005.

2. Shindelov A. V., Ivanov N. M. Engineering and environmental support for weed control // Agricultural machinery and technology. 2019. Vol. 13. No. 3. P. 18-23. doi: 10.22314/2073-7599-2019-13-3-18-23.

3. Forecasting crop yields: data structure and artificial intelligence methods / V. K. Kalichkin, K. Yu. Maksimovich, O. A. Aleshchenko, et al. // Agricultural machinery and technology. 2025. Vol. 19. No. 2. P. 33-44. doi: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-33-44.

4. Mirzaev M. A. Development of an algorithm for a robotic device for precise application of plant protection products // Agricultural Machinery and Technologies. 2022. Vol. 16. No. 3. P. 74-80. doi: 10.22314/2073-7599-2022-16-3-74-80.

5. Diprose M. F., Benson F. A., Willis A. J. The effect of externally applied electrostatic fields, microwave radiation, and electric currents on plants and other organisms, with special reference to weed control // The Botanical Review. 1984. Vol. 50. No. 2. P. 171-223. doi: 10.1007/BF02862633.

6. Ghoshal G. Comprehensive review on pulsed electric field in food preservation: gaps in current studies for potential future research // Heliyon. 2023. Vol. 9. No. 6. P. e17532. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17532.

7. Tsench Yu. S., Godlevskaya E. V. Mathematical modeling as a tool for designing agricultural machinery and units // Agricultural Machinery and Technologies. 2023. Vol. 17. No. 2. P. 4–12. doi: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-4-12.

8. AE—Automation and Emerging Technologies: Robotic Weed Control using Machine Vision / J. Blasco, N. Aleixos, J. M. Roger et al. // Biosystems E ngineering. 2002. Vol. 83. No. 2. P. 149-157. doi: 10.1006/bioe.2002.0109.

9. Patel A. M., Ferdowsi M. Advanced Current Sensing Techniques for Power Electronic Converters // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2007. P. 112-117. doi: 10.1109/VPPC.2007.4544109.

10. Ripka P. Electric current sensors: a review // Measurement Science and Technology. 2010. Vol. 21.No. 11. P. 112001. doi: 10.1088/0957-0233/21/11/112001.

11. Patent No. 2719794 C2 Russian Federation, IPC G01R 15/18, G01R 19/00. Current sensor and device for measuring electric current: No. 2016144165: appl. 10.11.2016: published 23.04.2020 / L. Jurankar; applicant Schneider Electric Industry SAS. EDN ADVALT.

12. Certificate of state registration of the topology of an integrated circuit No. 2016630163 Russian Federation. Current sensor: No. 2016630089: appl. 25.07.2016: published 24.11.2016 / A. B. Grabov, V. I. Sukhanov, N. N. Sukhanova; applicant Joint Stock Company "Scientific and Production Association of Measuring Equipment". – EDN TIECSO.

13. Slaughter D. C., Giles D. K., Downey D. Autonomous robotic weed control systems: A review // Computers and Electronics in Agriculture. 2008. Vol. 61. No. 1. P. 63-78. doi: 10.1016/j.compag.2007.05.008.

14. Yudaev I. V., Daus Yu. V. The nature of changes in the electrical conductivity properties of weed plant tissues during electric pulse damage // News of higher educational institutions. North Caucasus region. Technical sciences. 2018. No. 3 (199). P. 134-141. doi: 10.17213/0321-2653-2018-3-134-141.

15. Yudaev I. V. Analysis of changes in the parameters of the equivalent circuit of weed plant tissue under electric pulse action // Electronic processing of materials. 2018. Vol. 54. No. 2. P. 82-88.

16. Current sensing techniques: A review / S. Ziegler, R. C. Woodward, H. H. C. Iu, et al. // IEEE Sensors Journal. 2009. Vol. 9. No. 4. P. 354-376. doi: 10.1109/JSEN.2009.2013914.

17. Adamo F., Attivissimo F., Di Nisio A. Comparison of current sensors for power consumption assessment of wireless sensors network nodes // IEEE International Workshop on Measurement Networks. 2017. P. 54-59. doi: 10.1109/IWMN.2017.8050361.

18. Lenz J., Edelstein A. S. Magnetic sensors and their applications // IEEE Sensors Journal. 2006. Vol. 6.No. 3. P. 631-649. doi: 10.1109/JSEN.2006.874493.

19. Realization and optimization of bus bar current transducers based on Hall effect sensors / M. Blagojevic, U. Jovanovic, I. Jovanovic, et al. // Measurement Science and Technology. 2016. Vol. 27.No. 6. P. 065102. doi: 10.1088/0957-0233/27/6/065102.

20. Klimenko K. A. Calculation of design parameters of a transformer current sensor with a short-circuited ring // Natural and technical sciences. 2014. No. 7(75). P. 82-84. EDN SNWNKD.

21. Uglovskiy A. S., Semerenko N. Yu. Mobile system for weed control using a high-voltage discharge and feedback based on a current sensor // Agrotechnics and energy supply. 2024. No. 4(45). P. 26-33. EDN SACMNZ.