

УДК 631.5/9:004

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СЕНСОРНАЯ СИСТЕМА СВЕТОЦВЕТОВОГО КОНТРОЛЯ ПОЧВЫ: РЕАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИЙ САМОДОСТАТОЧНОСТИ

*Докт. техн. наук, проф., лауреат Государственной премии КОЛЕШКО В. М.,  
канд. техн. наук, доц., лауреат Государственной премии ГУЛАЙ А. В.,  
ГУЛАЙ В. А., ПОЛЫНKOVA Е. В.*

*Белорусский национальный технический университет*

В последнее время в мире аграрных технологий как никогда актуален термин «точное земледелие», или, как его еще называют, «прецизионное земледелие», «адаптивное земледелие». В свете развиваемых нами представлений можно дать следующее определение технологии точного земледелия: это интеллектуальное управление продуктивностью посевов с учетом результатов сенсорного контроля локальных особенностей почвы каждого сельскохозяйственного поля. Оптимальное управление растениеводством в каждой точке поля позволяет получить максимальную прибыль при экономии хозяйственных и сбережении природных ресурсов. Для реализации методов точного земледелия разрабатываются интеллектуальные системы сенсорного контроля почвы и автоматического управления сельскохозяйственными машинами.

В технологии точного земледелия эффективны светоцветовые методы интеллектуального сенсорного контроля, позволяющие выполнять оценку параметров почвы в режиме on-the-go, т. е. в режиме реального времени непосредственно в процессе движения сельскохозяйственного агрегата [1, 2]. Основным направлением совершенствования данных методов интеллектуального контроля представляется расширение возможностей предварительной обработки сенсорной информации и введение функций самообеспечения сенсорных систем. Так, придание сенсорной системе функции самоаттестации и сопровождение результатов контроля важной дополнительной информацией – оценкой уров-

ня достоверности полученных данных – позволяют в значительной степени минимизировать ущерб, причиняемый отказами и деградацией сенсорного оборудования.

В связи с изложенным выше при разработке интеллектуального светоцветового модуля уделялось внимание не только возможности измерения коэффициентов яркости почвы в разных диапазонах оптического спектра, но и идентификации типа почвы в соответствии с ее цветом. Кроме того, в состав задач, решаемых сенсорным прибором, введена функция самокоррекции – возможность коррекции светового потока, который изменяется при изменении температурного режима оптического излучателя. Перечень возможностей сенсорного модуля расширен также за счет введения функции самодиагностики (диагностики излучателей света) для исключения использования сигналов с выхода неисправных приборов. В разработанной интеллектуальной системе полученные результаты сенсорного контроля сопровождаются информацией об их достоверности (функция самоаттестации интеллектуальной сенсорной системы).

**Модель функционирования интеллектуальной сенсорной системы при реализации функций самодостаточности.** Конструктивная часть и оптическая схема интеллектуального модуля для светоцветового контроля почвы приведены на рис. 1. Работу электронно-оптического модуля в наиболее общем виде можно представить следующим образом. Микроконтроллер осуществляет включение источника

оптического излучения – светодиода, при этом часть светового потока, излучаемого светодиодом, попадает на контрольный фотодиод. По напряжению с контрольного фотодиода регулируется ток, протекающий через светодиод. Основная часть светового потока падает на исследуемую поверхность почвы, отражается от нее и принимается рабочим фотодиодом. Микроконтроллер фиксирует напряжение на выходе рабочего фотодиода и сохраняет его в памяти. Данную последовательность операций микроконтроллер повторяет для всех светодиодов интеллектуальной сенсорной системы, т. е. по всем спектральным линиям (например, 400; 470; 520; 590; 610; 630 нм) и спектральным полосам (инфракрасное излучение, белый свет) используемого оптического диапазона [3–5].

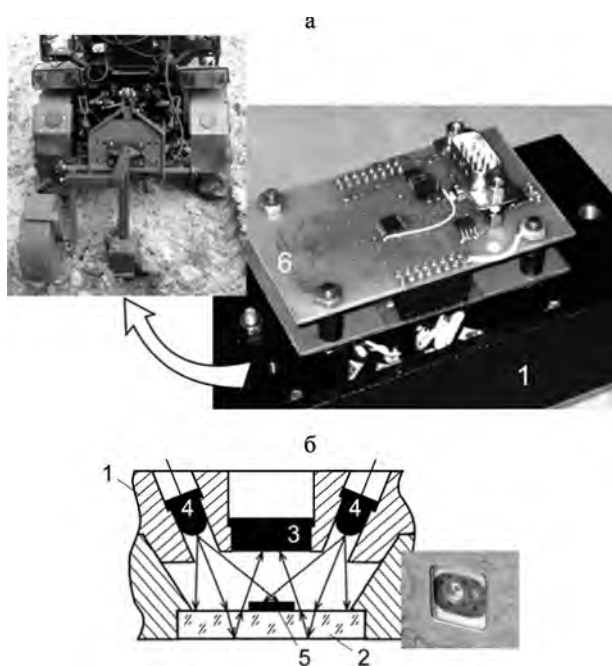


Рис. 1. Конструктивная часть (а) и оптическая схема (б) электронно-оптического модуля интеллектуальной светодетекторной системы: 1 – корпус; 2 – прозрачное окно; 3 – рабочий фотодиод; 4 – светодиоды; 5 – контрольный фотодиод; 6 – электронная схема

В памяти микроконтроллера хранятся данные в виде информационных образов различных типов почвы. Для каждого типа почвы в память микроконтроллера занесены восемь значений коэффициента яркости (по числу используемых спектральных линий), а также соответствующие значения светового потока всех светодиодов. Кроме того, в памяти микроконтроллера находится таблица значений коэффи-

циента яркости для аттестованной белой поверхности, с помощью которых проводится проверка сенсорного модуля. Электронно-оптический модуль передает данные посредством 9-битного асинхронного последовательного протокола. Девятый бит служит флагом адресации устройства: если девятый бит равен 0, то передаваемый байт – адрес, при ином значении девятого бита передаваемый байт содержит данные о параметрах почвы.

Сенсорный модуль имеет универсальный и личный идентификационный номер. Если к общей шине подключено несколько таких модулей, они будут опрашиваться поочередно, и в качестве адреса будет использован личный номер. Формат передачи данных имеет вид: «Адрес получателя» – «Адрес отправителя» – «Команда» – «CRC16». После того как микроконтроллер принял байт адреса и распознал его как верный, микроконтроллер приступает к приему следующего байта – адреса отправителя. Затем принимаемым байтом является команда, причем для разработанного модуля возможны два типа команд: провести проверку модуля; определить тип почвы. После команды следует два байта CRC16: если принятое значение CRC совпало с рассчитанным, микроконтроллер приступает к выполнению поступившей команды.

**Проверка сенсорного модуля.** В случае поступления команды на проведение проверки электронно-оптического модуля микроконтроллер включает первый светодиод и оцифровывает 16 значений напряжения на рабочем фотодиоде. Далее микроконтроллер вычисляет среднее значение данного напряжения и вычитает из него запрограммированное значение коэффициента яркости для аттестованной белой поверхности. Затем микроконтроллер регулирует ток, проходящий через светодиод, в сторону уменьшения модуля разности светового потока (напряжение с фотодиода) при отражении от белой поверхности и значений, занесенных в память. Данная операция проводится до тех пор, пока не будет выбрана минимальная разность указанных величин. После этого микроконтроллер включает светодиод, поддерживая ток установленной величины, и оцифровывает 16 значений напряжения на контрольном фотодиоде. Далее он вычисляет среднее значение и записывает его во Flash-память. Приведенный

цикл операций по проверке электронно-оптического модуля повторяется для всех светодиодов интеллектуальной системы цветоцветового контроля почвы.

**Определение типа почвы.** В памяти микроконтроллера хранится 64 оцифрованных значения напряжения с рабочего фотодиода по каждой спектральной линии. Микроконтроллер вычисляет средние значения и коэффициенты вариации по каждой спектральной линии. Коэффициент вариации  $V$  в данном случае определяется с использованием следующего выражения:

$$V = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{63} (AD_i - AD_{cp})^2 / 63}{AD_{cp}}}, \quad (1)$$

где  $AD_i$  –  $i$ -е значение выходного сигнала АЦП;  $AD_{cp}$  – среднее значение коэффициента яркости почвы.

Далее микроконтроллер проводит распознавание информационного образа, формируемого в процессе контроля почвы. В данном случае под распознаванием цветоцветового сенсорного образа почвы понимается сопоставление по определенному правилу цвета почвенного образца, представленного полученным набором коэффициентов яркости для разных длин волн оптического излучения, с одним из эталонных образов, хранящихся в памяти микроконтроллера. В качестве решающего правила сопоставления почвенных образов применяется способ выбора наиболее близкого эталонного образа по наименьшей величине евклидова расстояния

$$R = \sqrt{\sum_{i=0}^7 A_i (AD_{i\text{cp}} - AD_{i\text{табл}})^2}, \quad (2)$$

где  $A_i$  – весовое значение для  $i$ -го коэффициента яркости;  $AD_{i\text{cp}}$  – среднее значение коэффициента яркости для  $i$ -й спектральной линии;  $AD_{i\text{табл}}$  – то же табличное. Если рассчитанный коэффициент вариации превышает определенное, предварительно установленное значение (например, 16 %), то данный коэффициент пропускается. Тип почвы, для которой евклидово расстояние имеет наименьшую величину, считается идентичным с контролируемым почвенным образцом.

Далее микроконтроллер приступает к реализации функции самоаттестации интеллектуальной системы, которая выражается в определении достоверности полученного результата сенсорного контроля почвы. Самая высокая достоверность результата измерений устанавливается при следующих условиях: полной исправности сенсорного модуля; оптимальной температуре окружающей среды; сравнительно низких коэффициентах вариации выходных данных (ниже заданных значений). В соответствии с рассчитанными коэффициентами вариации и байтом состояния сенсорной системы достоверность результата контроля уменьшается на соответствующую величину.

После этого оценивается влияние температуры на достоверность результатов сенсорного контроля. В памяти микроконтроллера хранятся экспертные данные по влиянию температуры на достоверность результатов контроля. При понижении или повышении температуры окружающей среды, влияющей на стабильность работы электронных компонентов сенсорного модуля, микроконтроллер уменьшает достоверность данных на соответствующую величину. Далее микроконтроллер записывает в буфер передатчика данные в формате (формат ответа на запрос), имеющем следующий вид: «Адрес получателя» – «Адрес отправителя» – «Тип почвы» – «Достоверность результата» – «Состояние системы» – «CRC16». Рассматриваемые функции самообеспечения (самодиагностики, самокоррекции и самоаттестации) разработанной интеллектуальной сенсорной системы обобщены в табл. 1.

Таблица 1

Реализация функций самодостаточности в интеллектуальном сенсорном модуле контроля почвы

№ п/п	Реализуемые функции	Описание функций самообеспечения
1	Самодиагностика	Контроль исправности каждого светодиода: выход из строя светодиода и отсутствие сигнала на его выходе во время снятия данных фиксируется в байте состояния модуля. Получение данных по каждой спектральной линии с относительно высоким коэффициентом вариации (выше установленного значения) также фиксируется в байте состояния системы

Окончание табл. 1

№ п/п	Реализуемые функции	Описание функций самообеспечения
2	Самокоррекция	<p>Коррекция реакций контрольного и рабочего фотодиодов при проверке модуля путем подстройки тока светодиодов по заранее установленным экспертным данным.</p> <p>Коррекция интенсивности излучения светодиодов во время работы модуля: изменение светового потока светодиода компенсируется изменением тока, протекающего через светодиод, по предварительно полученным поверочным данным</p>
3	Самоаттестация	<p>При реализации функции самоаттестации интеллектуального сенсорного модуля учитываются результаты самодиагностики и самокоррекции системы.</p> <p>Самая высокая достоверность результата измерений устанавливается при следующих условиях:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>а) при полной исправности сенсорного модуля;</li> <li>б) при оптимальной температуре окружающей среды;</li> <li>в) при низких (определенных) значениях коэффициента вариации выходных данных. <p>Достоверность результата измерений снижается на заранее полученную экспертным путем величину:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>а) при сравнительно больших значениях коэффициента вариации или при выходе из строя светодиода;</li> <li>б) при понижении или повышении температуры окружающей среды, влияющей на стабильность работы электронных компонентов модуля</li> </ul> </li></ul>

**Схемотехнические решения по реализации функций самообеспечения интеллектуальной сенсорной системы.** Структурная схема разработанного интеллектуального модуля для светоцветового контроля почвы представлена на рис. 2. Схема подключения микроконтроллера и источника вторичных напряжений приведена на рис. 3, а схема управления светодиодами импульсами и обработки сигналов фотоприемника – на рис. 4. Представляется важным дать краткую характеристику основных компонентов, входящих в состав электрон-

ных блоков интеллектуального светоцветового модуля: источника вторичных напряжений, блока интерфейса RS-232, схемы формирования оптических импульсов, блока приема отраженных световых импульсов, блока управления и обработки данных.

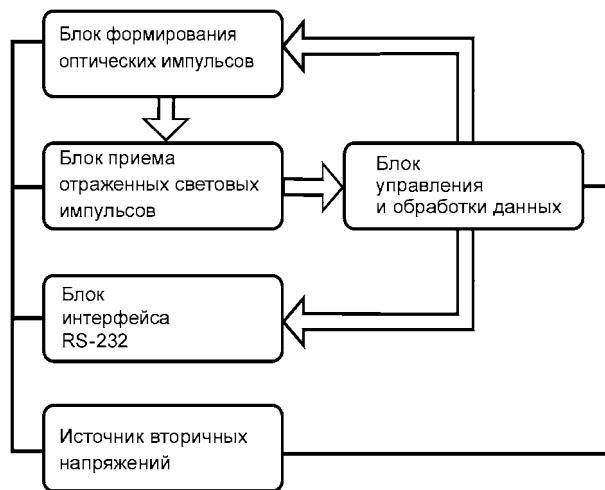


Рис. 2. Структурная схема интеллектуального сенсорного модуля для светоцветового контроля почвы

**Источник вторичных напряжений.** Поскольку разработанный сенсорный прибор выполняется в мобильном варианте и базируется на сельскохозяйственных машинах, его питание осуществляется от источника постоянного напряжения 12 В. В качестве источника опорного напряжения АЦП используется внутренний генератор опорного напряжения микроконтроллера. Для получения стабилизированного напряжения питания цифровых микросхем 5,0 и 3,3 В применяются линейные стабилизаторы напряжения LM1117MPX-5.0 и LM1117MPX-3.3 соответственно. Они характеризуются низким минимальным падением напряжения, высоким подавлением помех по питанию и высокой точностью. В соответствии со своими параметрами (максимальное входное напряжение – 20 В; выходное напряжение для LM1117MPX-5.0: 4,8–5,2 В, для LM1117MPX-3.3: 3,168–3,432 В; нестабильность выходного напряжения – 1 мВ) данные линейные стабилизаторы напряжения вполне применимы в схеме источника вторичных напряжений интеллектуальной сенсорной системы. Возможно также использование аналогов указанных микросхем с характеристиками, не хуже приведенных выше.

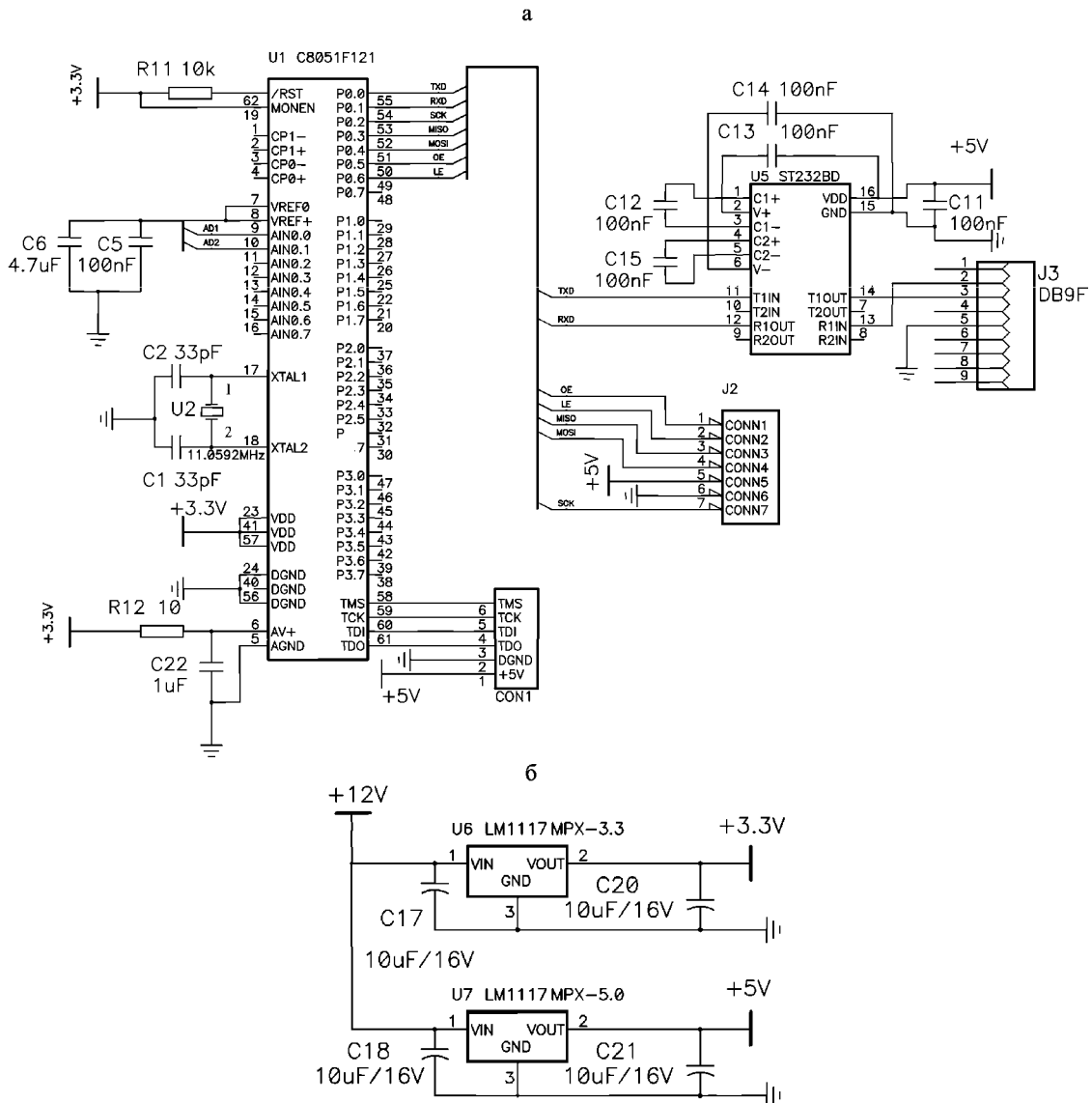


Рис. 3. Схема подключения: а – микроконтроллера; б – источника вторичных напряжений интеллектуальной системы

**Блок интерфейса RS-232.** Данный блок необходим для преобразования TTL-уровней контроллера в уровни RS-232. В качестве преобразователя используется микросхема ST232BD, которая характеризуется следующими параметрами: входное напряжение приемника –  $\pm 30$  В; выходное напряжение передатчика –  $\pm 7,8$  В; максимальная скорость передачи – 220 кбит/с.

**Блок формирования оптических импульсов.** В качестве источников монохроматического света используются суперяркие светодиоды LED1–LED8. Для управления током, протекающим через светодиоды, и диагностики их исправности применяется, например, микросхема MBI5171CD. Величина светового потока све-

одиодов имеет сильную зависимость от температуры, поэтому используется обратная связь в виде дополнительного фотодиода, позволяющего количественно оценить световой поток светодиода и при необходимости увеличить или уменьшить ток, проходящий через светодиод, при помощи светодиодного драйвера MBI5171CD. Параметры данной микросхемы (8 каналов с постоянным током; максимальный ток через канал – 120 мА; максимальная частота – 25 МГц; высокая точность стабилизации тока: между каналами < 3 %, между микросхемами < 6 %) удовлетворяют требованиям, предъявляемым к компонентам интеллектуальной системы светоцветового контроля.

**Блок приема отраженных световых импульсов.** Данный блок состоит из фотодиода и подключенной к нему микросхемы операционного усилителя LM833D. Операционный усилитель подключен по схеме преобразования тока в напряжение. Указанная микросхема состоит из двух операционных усилителей, один из которых используется в связке с фотодиодом, принимающим отраженные оптические импульсы, а второй – в связке с фотодиодом, принимающим импульсы, излучаемые светодиодами. Микросхема характеризуется достаточно высоким коэффициентом усиления (110 дБ) и низким уровнем шума (4,5 нВ).

**Блок управления и обработки данных.** Данный блок состоит из микроконтроллера C8051F121, который выполняет следующие функции: управление световыми импульсами и их коррекция; прием и хранение оцифрованного значения отраженных импульсов; диагностика чувствительных элементов; обработка данных и формирование результатов; аттестация результатов контроля; прием и передача данных по интерфейсу RS-232. Для выполнения указанных функций микросхема включает следующие компоненты: 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь (программируемая скорость до 100 тысяч преобразований в секунду; усилитель с программируемым коэффициентом усиления; встроенный датчик температуры); 12-разрядный цифроаналоговый преобразователь; источник опорного напряжения; схему мониторинга напряжения питания; высокопроизводительное 8051-совместимое процессорное ядро (конвейерная архитектура; производительность до 100 миллионов операций в секунду со встроенной системой фазовой автоподстройки частоты; умножитель-аккумулятор 16×16, требую-

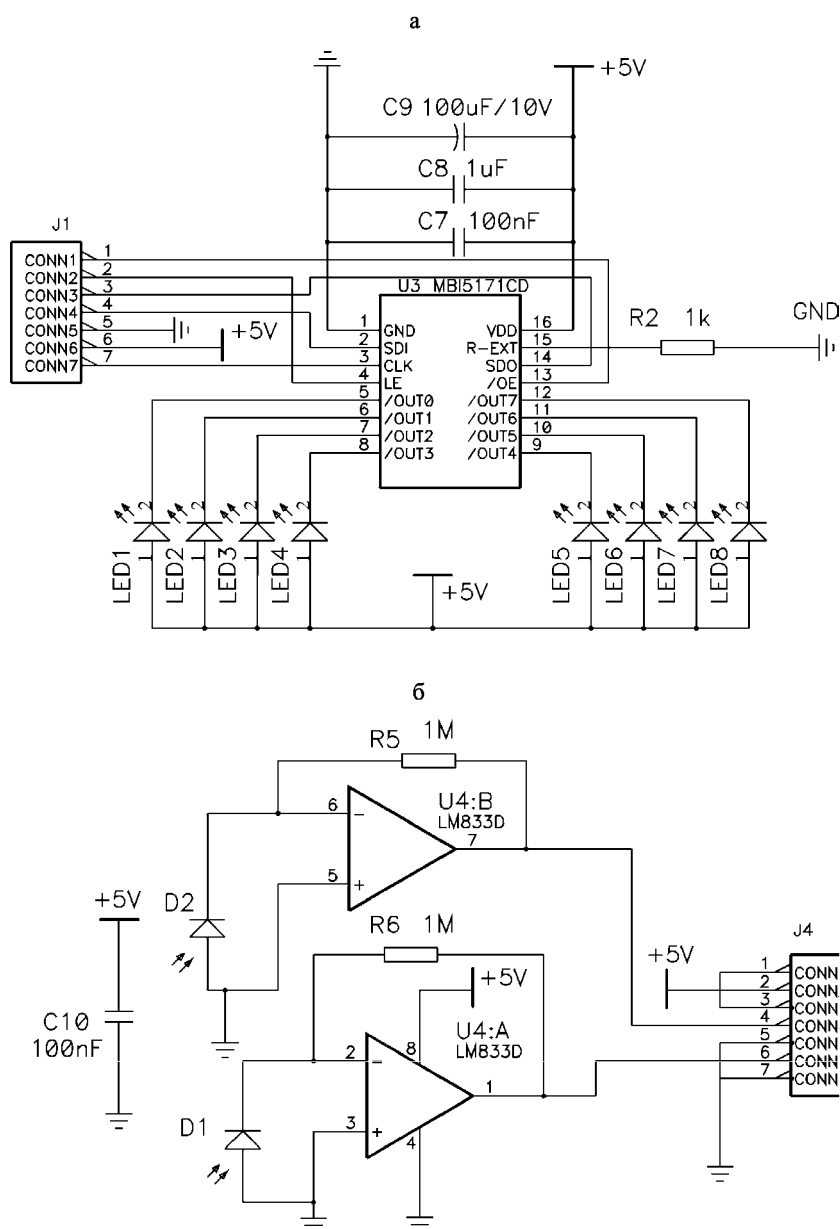


Рис. 4. Схема: а – управления светодиодными импульсами; б – обработки выходных сигналов фотоприемника

щий два системных такта для выполнения операций умножения); 8448 байт внутренней ОЗУ данных; 64 кбайт разделенной на банки Flash-памяти с возможностью внутрисхемного программирования секторами по 1024 байт.

**Алгоритм функционирования интеллектуального сенсорного модуля для светового контроля почвы.** После включения питания микроконтроллер приступает к инициализации, которая заключается в увеличении его тактовой частоты за счет использования

встроенной системы автоподстройки частоты. Элементом стабилизации частоты тактового сигнала служит кварцевый резонатор с частотой 11059200 Гц. При помощи указанной системы автоподстройки можно увеличить тактовую частоту до 100 миллионов операций в секунду. После настройки генератора микроконтроллер приступает к настройке периферийных модулей. Далее микроконтроллер переходит в режим ожидания новой команды. Каждые 50 мкс переполнение таймера запускает аналого-цифровое преобразование, по окончании которого микроконтроллер переходит к процедуре обработки прерывания по АЦП. Микроконтроллер записывает 16 оцифрованных значений с одного светодиода, гасит его и включает другой светодиод. Всего по каждой спектральной линии хранятся 64 значения.

Если микроконтроллер получает команду «Провести проверку модуля», то он выполняет следующие действия:

- 1) включает режим проверки прибора;
- 2) ожидает окончания проверки;
- 3) усредняет полученные данные;
- 4) записывает результаты во Flash-память;
- 5) осуществляет переход в подпрограмму ожидания новой команды.

При получении команды «Определить тип почвы» микроконтроллер производит следующее:

- 1) определяет среднее значение коэффициента яркости на определенной спектральной линии;
- 2) вычисляет сумму квадратов разности между полученными значениями коэффициента яркости и его средней величиной;
- 3) выполняет деление полученного результата на 63;
- 4) дважды производит деление полученного результата на среднее значение коэффициента яркости;
- 5) при получении результата больше 256 записывает коэффициент вариации, равный 255, в противном случае вычисляет квадратный корень из полученного результирующего значения;
- 6) заносит в память среднее значение и коэффициент вариации на данной спектральной линии;
- 7) проводит проверку вычисления средних значений коэффициента яркости и коэффициентов вариации для всех спектральных линий;

переходит к п. 1, если вычисления не выполнены;

8) вычисляет евклидово расстояние от исследуемого значения до соответствующей табличной величины; устанавливает достоверность результата;

9) сравнивает полученную величину евклидова расстояния с его минимальным значением; переходит к выполнению п. 11, если полученная величина больше минимального значения;

10) записывает номер почвенного образца и полученное евклидово расстояние как минимальное;

11) проверяет на окончание чтения таблицы с параметрами почв; переходит в п. 8, если чтение таблицы незакончено;

12) определяет зависимость достоверности результата от температуры;

13) записывает в буфер передатчика свой адрес, адрес получателя, тип почвы, достоверность результата, CRC;

14) осуществляет переход в подпрограмму ожидания новой команды.

## ВЫВОДЫ

1. Разработан интеллектуальный сенсорный модуль светоцветового контроля почвы для технологии точного земледелия, в котором реализованы функции самодиагностики, самокоррекции и самоаттестации. Функция самодиагностики реализуется в виде контроля исправности каждого светодиода: неисправность светодиода и отсутствие сигнала на его выходе во время снятия данных фиксируется в байте состояния модуля. Получение данных по каждой спектральной линии с высоким коэффициентом вариации (выше установленного значения) также фиксируется в байте состояния системы. Функция самокоррекции реализуется в виде коррекции реакций контрольного и рабочего фотодиодов при проверке модуля путем подстройки тока светодиодов по заранее установленным экспертным данным. Коррекция интенсивности излучения светодиодов во время работы модуля – изменение светового потока светодиода компенсируется регулированием тока, протекающего через светодиод, по предварительно полученным поверочным данным.

2. При реализации функции самоаттестации интеллектуального сенсорного модуля учитываются результаты самодиагностики и само-

коррекции системы. Самая высокая достоверность результата измерений устанавливается при следующих условиях: полной исправности сенсорного модуля; оптимальной температуре окружающей среды; сравнительно низких (определенных) коэффициентах вариации выходных данных. Достоверность результатов контроля снижается на заранее полученную экспертным путем величину: при больших значениях коэффициента вариации или при выходе из строя светодиода; при понижении или повышении температуры окружающей среды, влияющей на стабильность работы электронных компонентов модуля.

3. Предложена структурная схема сенсорного модуля, в которую включены: блок вторичных напряжений; блок интерфейса; блок формирования оптических импульсов; блок приема отраженных световых импульсов; блок управления и обработки данных. Разработаны принципиальные электрические схемы модуля на основе микроконтроллера, светодиодного драйвера, микросхемы интерфейса и схемы приема световых импульсов. Разработана программа работы микроконтроллера, реализующая функции управления световыми импульсами, обработки сигналов фотоприемника, приема-передачи данных, коррекции чувствительных эле-

ментов, диагностики неисправности системы и аттестации результатов контроля.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Колешко, В. М. Нейросетевые технологии – базис создания интеллектуальных систем точного земледелия / В. М. Колешко, А. В. Гулай, С. А. Лученок // Материалы второго Белорусского космического конгресса, Минск, 25–27 окт. 2005 г. – Минск, 2005. – С. 376–380.
2. Колешко, В. М. Интеллектуальные сенсорные системы для технологии точного земледелия / В. М. Колешко, А. В. Гулай, С. А. Лученок // Научно-инновационная деятельность и предпринимательство в АПК: проблемы эффективности и управления: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 16–18 февр. 2006 г. – Минск, 2006. – С. 115–118.
3. Колешко, В. М. Светоцветовой метод эволюционной диагностики почв для технологии точного земледелия / В. М. Колешко, А. В. Гулай, С. А. Лученок // Теоретическая и прикладная механика: межвед. сб. науч.-метод. ст. – 2006. – Вып. 20. – С. 198–208.
4. Колешко, В. М. Формирование светоцветового информационного образа почвы в технологии точного земледелия / В. М. Колешко, А. В. Гулай, С. А. Лученок // Теоретическая и прикладная механика. – 2007. – Вып. 22. – С. 279–286.
5. Интеллектуальная сенсорная система «КРОТ» – контроль распределения органики и температуры / В. М. Колешко [и др.] // Научно-инновационная деятельность в агропромышленном комплексе: сб. науч. ст. 3-й Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 29–30 мая 2008 г. – Минск, 2008. – Ч. 2. – С. 27–30.

Поступила 14.06.2010

УДК 504

## СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ ПРОЕКТОВ

*Канд. техн. наук, доц. РЫБАК В. А., докт. техн. наук, проф. ГАТИХ М. А.,  
канд. техн. наук ОБРАЗЦОВ С. И., ВАЛЕНТЕЙЧИК В. В.*

*Белорусский институт системного анализа и информационного обеспечения научно-технической сферы,  
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Республиканское научно-исследовательское унитарное предприятие «БелНИЦ “Экология”»*

В последнее время в связи с увеличением объемов промышленного производства особую актуальность приобретает вопрос нормирования воздействий на окружающую среду. В соответ-

ствии с действующим законодательством в области природопользования объектами государственной экологической экспертизы (ГЭЭ) являются: