

# СЕНСОРНАЯ МИКРОСИСТЕМА СВЕТОЦВЕТОВОГО КОНТРОЛЯ ПОЧВЫ: СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Колешко В.М., Гулай А.В., Гулай В.А., Полынкова Е.В.

*Белорусский национальный технический университет, Минск*

*Представлены разработанные схемотехнические решения электронно-оптического модуля для светоцветового контроля почвы в технологии точного земледелия. Выполнен анализ структуры целей сенсорного контроля в точном земледелии, а также функциональное назначение основных компонентов сенсорной микросистемы для реализации целей контроля почвы. Приведены электрические схемы сенсорных модулей со стабилизацией интенсивности, а также с импульсной модуляцией оптического излучения. Описана интеллектуальная сенсорная микросистема на светодиодных драйверах с реализацией функций саморефлексии и алгоритм ее функционирования. Проанализирован опыт применения созданной сенсорной микросистемы при лабораторных исследованиях и полевых испытаниях предложенного способа светоцветового контроля почвы. Показано изменение коэффициента яркости почвы в различных диапазонах оптического спектра в зависимости от содержания в ней органических веществ.*

Один из наиболее продуктивных методов реализации технологий точного земледелия основан на получении и использовании достоверной информации о качестве почвы в каждой точке обрабатываемого сельскохозяйственного поля. Эффективным инструментом исследования свойств почвы и изменений, которые происходят в ней под влиянием человеческой деятельности, является контроль цветовых характеристик, которые наиболее полно и объективно определяются спектрами отражения. С учетом этого разработан светоцветовой метод контроля почвы в режиме реального времени по ее спектральной отражательной способности [1, 2]. Сущность разработанного метода заключается в формировании информационного образа в виде сочетания оптических параметров почвы и определении на его основе характеристик качества, в частности, концентрации в почве органических веществ. Для реализации данного метода создан ряд электронно-оптических модулей сенсорной микросистемы контроля почвы, схемотехнические решения и отличительные особенности которых представлены в настоящей работе.

## **Структурно-функциональное представление сенсорного контроля в технологии точного земледелия**

### **Структура целей сенсорного контроля в точном земледелии**

Значимость проблемы проектирования специальных сенсорных систем для контроля почвы определяется тем, что подходы, положенные в основу создания таких систем, оказывают существенное влияние на формирование структуры целей, достигаемых в технологии точного земледелия. Структуру целей на разных уровнях планирования и организации сельскохозяйственного производства (условно приняты оперативный, тактический, стратегический уровни) определим, отталкиваясь от интеллектуального процесса формирования динамического многопараметрового информационного образа (комплексного, обобщенного параметра) почвы как одного из центральных вопросов реализации технологии точного земледелия. Построение структуры целей на основе формирования информационного образа почвы с обобщением его к параметру плодородия почвы поясняется схемой на рис. 1.

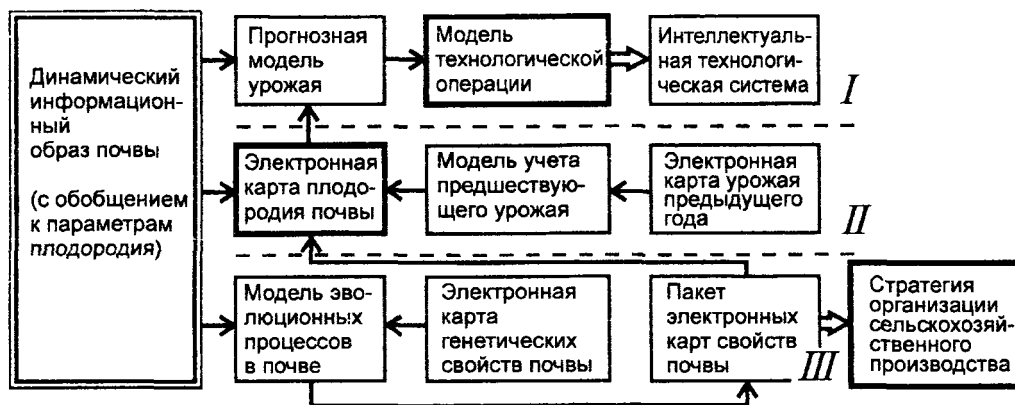


Рис. 1. Структура целей на разных уровнях реализации технологии точного земледелия

На оперативном уровне (I) контролируемые параметры почвы используются для создания прогнозной модели урожая, на основе которой интеллектуальная технологическая система реализует модель конкретной операции аграрного производства. На этой технологической стадии получение информационного сенсорного образа почвы является определяющим в реализации идеи точного, адаптивного земледелия. На тактическом уровне (II) для создания электронной карты плодородия почвы кроме оперативной, текущей сенсорной информации о свойствах и состоянии почвы используются также отложенные сведения о предшествующем урожае на обрабатываемом поле, которые обобщены в виде электронной карты урожая предыдущего года. В данном случае текущая информация о состоянии почвы используется как корректирующая в уточнении электронной карты плодородия. На уровне определения стратегии организации сельскохозяйственного производства (III) на основе пакета электронных карт физико-химических свойств почвы динамический информационный сенсорный образ учитывается в модели эволюционных почвенных процессов параллельно со сведениями о генетических свойствах почвы.

Таким образом, главными целями на условно принятых технологических уровнях являются: на оперативном – формирование модели конкретной аграрной операции интеллектуальной технологической системой; на тактическом — создание электронной карты почвенного плодородия; на стратегическом — получение пакета электронных карт физико-химических свойств почвы. Выделенные уровни целей объединены процессом использования динамического информационного образа почвы, а также связаны между собой операциями формирования моделей и создания электронных почвенных карт. Так, пакет электронных карт физико-химических свойств почвы анализируется при создании электронной карты плодородия почвы, которая, в свою очередь, ложится в основу прогнозной модели урожая текущего года.

### Функции сенсорной микросистемы контроля почвы

Контроль отражательных характеристик почвы выполняется с помощью набора светодиодов и фотоприемника, а также устройства обработки информации (рис. 2). Сигнал с выхода фотоприемника обрабатывается микропроцессорным устройством, формирующим сенсорный информационный образ почвы. Мобильная интеллектуальная система технологического уровня оснащается аппаратурой спутниковой навигации, что позволяет осуществлять пространственную привязку результатов мониторинга почвы и использовать результаты контроля для создания высокоточных электронных почвенных карт. Сенсорная система светоцвето-

вого контроля может оснащаться подсистемой оценки других физических параметров почвы, например, блоком измерения ее температуры.

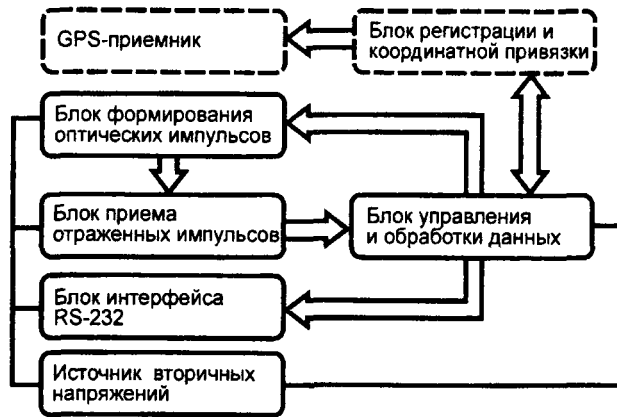


Рис. 2. Структурно-функциональная схема сенсорного модуля для светоцветового контроля почвы

При создании сенсорных систем для контроля отражательных свойств почвы учитывается антропоморфный характер метода оценки ее качества по цвету, которая выполняется визуально на протяжении многих веков. Поэтому в соответствии с разработанным способом измерения параметров отражения почвы производится на тех длинах волн видимого диапазона, которые соответствуют определенному чистому цвету. С этой точки зрения выбираются следующие спектральные точки сенсорного контроля: фиолетовый свет (400 нм), синий (470 нм), зеленый (520 нм), желтый (590 нм), оранжевый (610 нм), красный (630 нм); дополнительно - инфракрасное излучение, белый свет. Количество спектральных точек контроля  $n$  связано с масштабом неоднородности  $q$  параметра отражения почвы в видимом оптическом диапазоне соотношением  $n \geq c\Delta\lambda/q$ , где  $c > 1$  — постоянная,  $\Delta\lambda$  — ширина оптического диапазона. Учитывая, что величина  $q$  трудно поддается анализу и определению, разработана модификация сенсорной системы, в которой точки контроля не соотносятся с определенным цветом, а равномерно размещены вдоль спектрального диапазона. Для такого варианта сенсорной системы использованы светодиоды с длиной волны излучения 405; 460; 505; 530; 570; 620; 660 нм.

### Электронно-оптический сенсорный модуль со стабилизацией интенсивности оптического излучения

#### Особенности сенсорной микросистемы

Структурная схема сенсорной микросистемы состоит из следующих блоков: источника вторичных напряжений, схемы подключения микроконтроллера, схемы управления световыми импульсами, схемы обработки сигналов фотоприемника (рис. 3). Основной особенностью электронно-оптического блока является то, что питание светодиодов осуществляется стабилизированным током. Поскольку интенсивность излучения светодиодов прямо пропорционально току питания, следовательно, стабилизация тока позволяет снизить флуктуации интенсивности излучения при воздействии побочных факторов и за счет этого повысить точность контроля показателя отражения оптического излучения от контролируемого участка почвы.

Электронно-оптический блок выдает посредством интерфейсов RS-232 либо RS-485 (задается пользователем) восемь чисел в двоично-десятичном представлении, соответствующих коэффициентам отражения излучения по каждой из восьми спектральных линий. Диапазон каждого значения 0...1000. Значение 0 свидетельствует об отражении поверхностью излучения, более чем в 100 раз меньшего, нежели от калибровочной поверхности. Значение 1000 соответствует коэффициенту отражения излучения исследуемой поверхностью, равному коэффициенту отражения от эталонной поверхности, по которой проводится калибровка электронно-оптического блока.

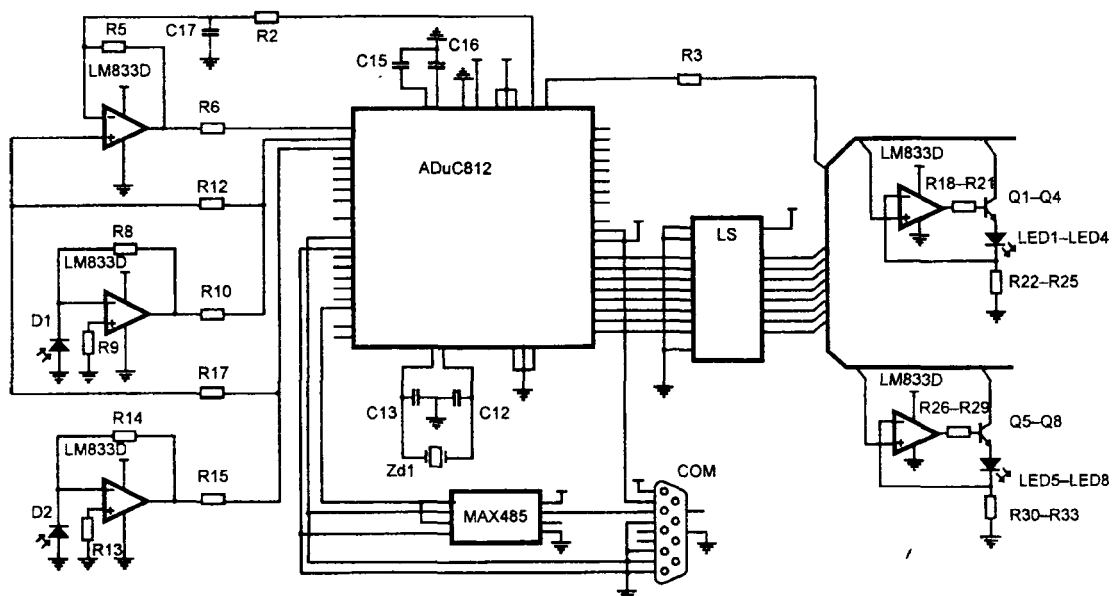


Рис. 3. Электрическая схема электронно-оптического модуля сенсорной микросистемы со стабилизацией интенсивности оптического излучения

Конструктивно электронная часть сенсорного блока выполняется в виде двух печатных плат с размерами порядка 48x80 мм, на которых размещены отдельные модули сенсорной системы, электрически соединенные между собой с помощью разъема. Обе платы механически крепятся к металлической панели, содержащей светодиоды и фотоприемники. Разработанная конструкция позволяет использовать фотодиоды, обладающие максимальной чувствительностью в разных диапазонах видимого спектра. Конструкция электронно-оптического блока оптимизирована таким образом, что один из фотодиодов принимает отраженный от почвы свет синего и фиолетового светодиодов, а другой фотодиод принимает отраженное излучение других светодиодов. Для увеличения интенсивности падающего излучения возможна установка двух светодиодов фиолетового цвета и двух светодиодов синего цвета, имеющих наименьшую излучательную способность. Использование разработанной конструкции позволяет выдерживать расстояние между контролируемой поверхностью почвы и плоскостью фотоприемников порядка 10 мм, что положительно сказывается на точности контроля качества почвы.

Рабочий диапазон температур электронно-оптического блока 0...+30 градусов, температура хранения -20...+50 градусов. Электронно-оптический блок питается от стабилизированного источника питания, напряжение питания 4.9...5.1 В, ток потребления не превышает 300 мА. Погрешность измерения электронно-оптического блока по каждой спектральной линии не более 1%. Длина линии передачи информации не должна превышать: 10 метров при исполь-

зовании интерфейса RS-232, 1000 метров — при использовании интерфейса RS-485.

**Источник вторичных напряжений** предназначен для генерации напряжения питания всех блоков сенсорной системы. На вход источника подается напряжение питания (VCC) +5 В. Преобразователь напряжения дает на линии VDD напряжение, необходимое для питания схемы управления световыми импульсами; ток источника 60 мА. На микросхеме LE66CD собран источник напряжения AVDD, необходимый для питания аналоговой части микроконтроллера и схемы обработки импульсов фотоприемника. Напряжение AVDD равно 5,5 В, его отклонение от нормального значения не превышает 1%.

**Микроконтроллер ADuC812** управляет работой электронно-оптического блока, проводит логические и математические операции над полученными результатами, осуществляет информационный обмен с устройством регистрации и координатной привязки. Микроконтроллер может находиться в трех режимах работы: программирования, калибровки, снятия и передачи данных.

**Схема управления импульсами светодиодов** осуществляет регулирование тока, протекающего через каждый светодиод. Ток через светодиод прямо пропорционален напряжению ЦАП микроконтроллера DAC1. Диапазон регулирования тока 0...40 мА. При напряжении DAC1, равном 1 В, ток через светодиод составляет 20 мА; для увеличения тока до 40 мА напряжение DAC1 должно составлять 2 В. Последовательность включения светодиодов определяется состоянием выходов микроконтроллера A1...A8.

**Схема обработки сигналов** осуществляет линейное преобразование мощности светового потока, поступающего на фотоприемник, в напряжение воспринимаемого диапазона АЦП микроконтроллера. Коэффициент преобразования определяет ЦАП микроконтроллера DAC0.

**Блок интерфейсов.** Обмен информацией с электронно-оптическим блоком происходит посредством интерфейсов RS-232 либо RS-485. Интерфейс RS-485 организован на микросхеме MAX485. Интерфейс RS-232 реализован непосредственно на управляющем микроконтроллере.

**Алгоритм работы.** Режим калибровки выполняется после поступления команды на калибровку от блока регистрации и координатной привязки (код 33h). В режиме снятия и передачи данных, после подачи напряжения питания на прибор, микроконтроллер инициализируется и переходит в ждущий режим, необходимый для завершения переходных процессов. Продолжительность данного режима 100 мс. При этом напряжение на двух ЦАП микроконтроллера равно нулю, все цифровые выходы находятся в состоянии логического нуля. После завершения режима микроконтроллер устанавливает на выходе DAC1 напряжение, определяющее ток через светодиод DS1, на выходе DAC0 — напряжение, определяющее коэффициент преобразования схемы обработки сигналов фотоприемника. Микроконтроллер находится в указанном состоянии 5 мс, после чего устанавливает логическую единицу на выводе A1 (включение светодиода DS2), а затем АЦП микроконтроллера начинает оцифровку напряжения на выводе ADC0. Получаемые данные заносятся в память микроконтроллера.

После завершения шестнадцати циклов оцифровки, микроконтроллер переводит вывод A1 в состояние логического нуля, усредняет 16 полученных данных, результат заносит в память. На выходе DAC1 устанавливает напряжение, определяющее ток через светодиод DS2, на выходе DAC0 - напряжение, определяющее коэффициент преобразования схемы обработки сигналов фотоприемника при горении DS2, и устанавливает логическую единицу на выводе A2 (включение све-

одиода DS2). Через заданный промежуток времени начинается оцифровка сигнала ADC0. В дальнейшем цикл повторяется для остальных светодиодов. В результате, после выключения восьмого светодиода, в памяти микроконтроллера записаны восемь усредненных значений АЦП. Затем цикл контроля возобновляется с первого светодиода. Восемь чисел, получаемых после включения всех светодиодов, сохраняются в буфере памяти микроконтроллера. В буфере хранятся данные четырех последних циклов контроля; после завершения пятого цикла данные первого цикла удаляются и заполняются данными, полученными во втором цикле. При получении запроса от блока регистрации и координатной привязки (код AAh) микроконтроллер доводит текущий цикл до конца, начинает новый цикл и во время ожидания перед включением первого светодиода усредняет данные, хранящиеся в буфере за четыре цикла, и отправляет их в блок регистрации и координатной привязки, сделавший запрос.

## **Сенсорная микросистема с модуляцией оптических сигналов и контролем температуры почвы**

### **Подключение микроконвертора**

В схеме использован микроконвертор — специальный гибридный микроконтроллер, предназначенный для выполнения аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразований с высокой степенью точности (рис. 4). Для устранения фоновых шумов в составе оптического сигнала, которые отрицательно влияют на точность контроля, в сенсорной системе используется модуляция излучения светодиодов и последующее детектирование принимаемых оптических сигналов. Сигнал модулируется с помощью генератора, выполненного на микросхеме 74HC00, частота настройки которого равна 100 кГц. Таким образом, с микроконтроллера снята функция генератора (как неосновная функция в работе сенсорной системы), он лишь выполняет включение генератора сигналом логической единицы на выводе GEN\_ON/OFF.

Выходы ADC0 и ADC1 используются для подачи на АЦП сигналов фотоприемника и сенсора температуры. Выводы DAC0 и DAC1 являются выходами ЦАП и предназначены для регулирования амплитуды оптических импульсов на светодиодах и управления коэффициентом усиления системы обработки сигналов фотоприемника. Выводы D1...11 служат для включения определенного светодиода. Выводы RxD и TxD являются линиями связи с управляющим микроконтроллером. С их помощью подключается также микроконвертор к микросхемам преобразования интерфейсов RS-422 и RS-232C (COM порт компьютера). С использованием вывода RE/DE при необходимости включается интерфейс RS-422. Для получения вторичных напряжений питания применяется микросхема 78L05 — стабилизатор постоянного напряжения 5 В.

### **Модуль интерфейсов**

Микросхема MAX489 преобразует TTL уровни интерфейса RS-232 в дифференциальные сигналы интерфейса RS-422. Микросхема MAX3232 служит для согласования устройства при его подключении к COM порту компьютера. Линия RE/DE разрешает передачу данных по интерфейсу RS-422.

### **Схема генерации оптических импульсов**

Импульсы частотой 100 кГц с выхода генератора на микросхеме 74HC00 после усиления поступают на вход модуля светодиодов. Ток, проходящий через све-

одиод, создает падение напряжения на резисторе RP1, которое усиливается с помощью операционного усилителя U103A с коэффициентом усиления, равным 5. Операционный усилитель U103B работает в режиме компаратора, на инвертирующий вход которого подается напряжение с цифро-аналогового преобразователя микроконвертора. Когда уровень напряжения на неинвертирующем входе микроконвертора превышает уровень напряжения ЦАП, открывается транзистор Q18, коммутирующий выход генератора на землю. Таким образом, ток, протекающий через светодиод, определяется напряжением ЦАП, то есть управляется микроконвертором; диапазон регулирования тока составляет 5–35 мА.

### **Схема обработки сигналов фотоприемника**

Фотодиод работает в режиме источника тока, при этом его выходной ток создает падение напряжения на резисторе R22. Это напряжение усиливается с помощью операционного усилителя U104B (коэффициент усиления равен 10). Далее, для выделения переменной составляющей сигнала используется конденсатор C14, а для его усиления — U104A с коэффициентом усиления 100. Детектирование сигнала производится с помощью цепочки D2–C17.

### **Схема подключения светодиодов**

Модуль светоизлучающих элементов состоит из восьми пар светодиодов, коммутируемых транзисторами Q46–Q61. На эмиттеры транзисторов подаются сигналы с выхода системы управления импульсами светодиодов, а порядок работы светодиодов определяется микроконвертором.

### **Блок контроля температуры**

Контроль температуры выполняется с использованием микроконтроллера PIC16F688T. Источник питания данного блока собран на основе стабилизатора напряжения 78L05, а для реализации функций интерфейса использована микросхема MAX489. Такое схемотехническое построение блока контроля температуры позволяет выполнять его в виде автономного конструктивного модуля в сенсорной системе мониторинга почвы.

### **Алгоритм работы сенсорного модуля**

При подаче напряжения питания на сенсорный модуль микроконвертор инициализируется и входит в режим снятия данных. Далее при поступлении на вход устройства управляющего кода 33h производится цикл нормирующих измерений. На данном этапе выполняется контроль коэффициента яркости эталонной белой поверхности, при этом контроллер генерирует последовательность импульсов светодиодов минимальной амплитуды. С помощью аналого-цифрового преобразователя снимаются показания фотоприемника, и с учетом полученных данных микроконвертор устанавливает амплитуды сигналов светодиодов такими, чтобы при следующем цикле контроля амплитуда принятых детектированных сигналов была равна 4 В. Если указанный уровень не достигнут, производятся повторные циклы подгонки. Уровни нормирующих значений ЦАП заносятся в память микроконвертора, и устройство отправляет код о готовности.

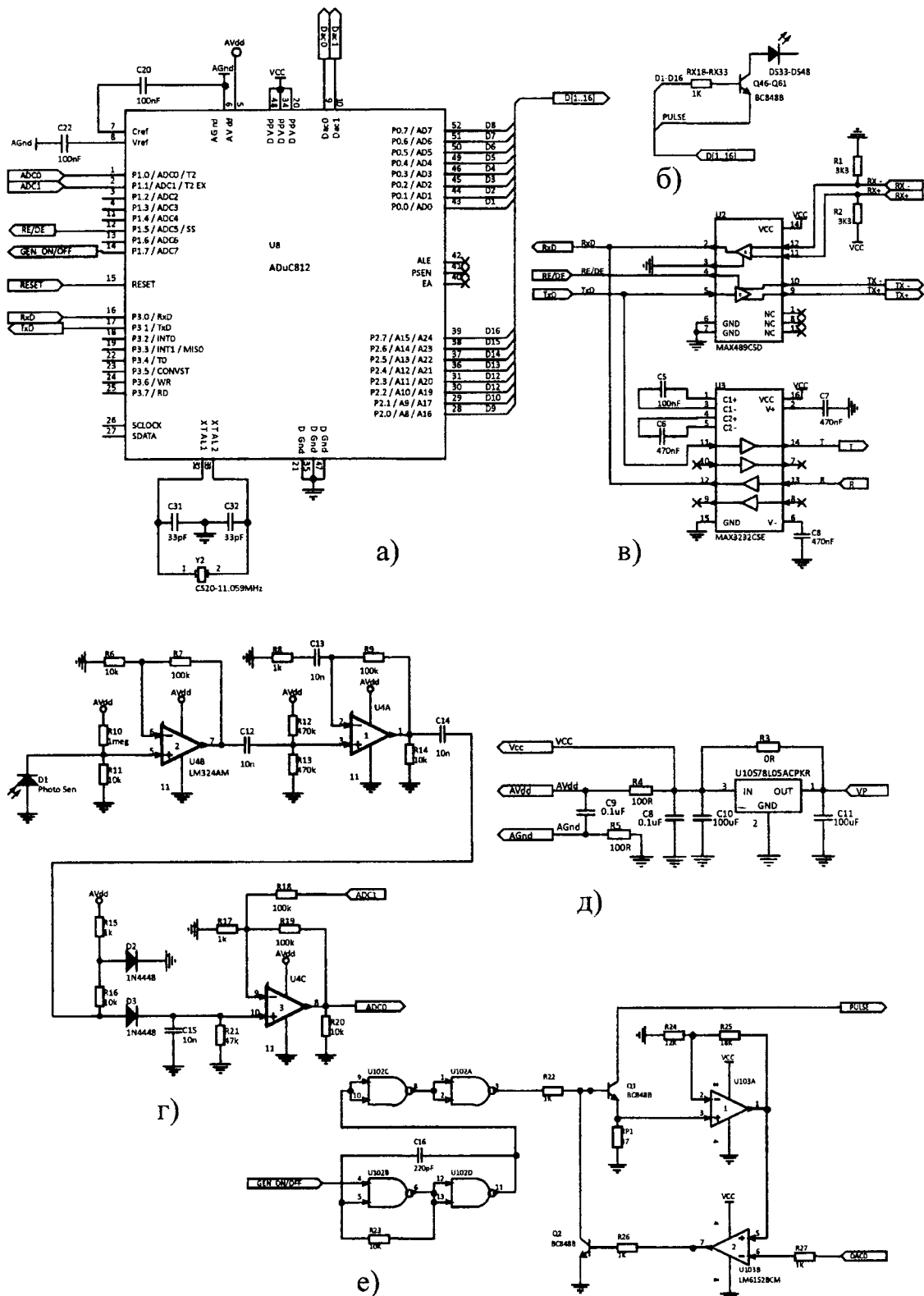


Рис. 4. Электрические схемы: а — подключение микроконвертора; б — система светодиодов; в — блок интерфейсов; г — блок обработки сигналов; д — источник вторичных напряжений; е — система управления светодиодами

В процессе работы управляющая система посылает запрос о проведении контроля, при этом сенсорный модуль производит цикл из четырех измерений. Полученные данные об интенсивности отраженного сигнала усредняются и записываются в память микроконвертора. Затем происходит деление полученных дан-



ных на нормировочную величину отраженного от белой поверхности сигнала. В результате получаются значения, соответствующие шестнадцати коэффициентам отражения. Благодаря использованию пар светодиодов одинаковых спектров компенсируется угол наклона устройства к контролируемой поверхности. Устройство отсылает 18 байт информации: 16 первых байт соответствуют восьми коэффициентам яркости почвы и два байта используются для проверки достоверности передаваемой информации.

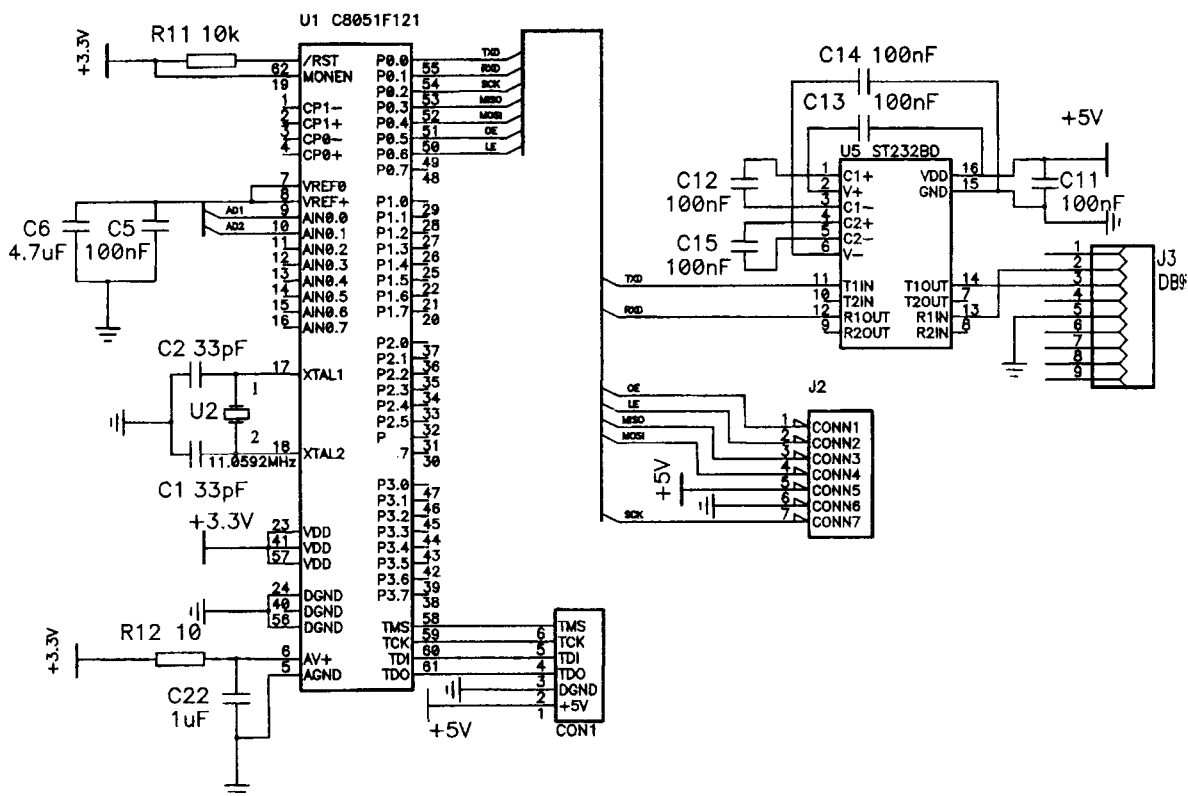
### **Интеллектуальная сенсорная микросистема на светодиодных драйверах с реализацией функций саморефлексии**

Схема подключения микроконтроллера и источника вторичных напряжений приведена на рис. 5, а схема управления светодиодными импульсами и обработки сигналов фотоприемника – на рис. 6. Представляется важным дать краткую характеристику основных компонентов, входящих в состав электронных 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.

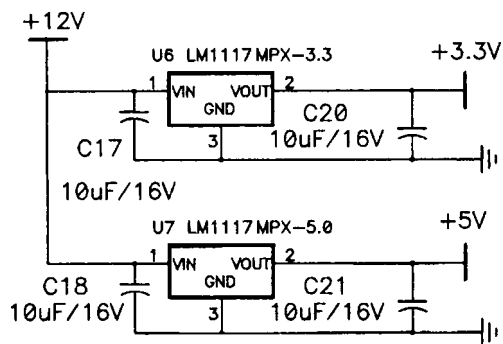
Отличительной особенностью данной сенсорной системы является то, что она реализует функции самодиагностики, например диагностики излучателей света, для исключения использования сигналов с выхода неисправных приборов. Кроме того, в состав задач, решаемых сенсорной системой введена функция самокоррекции — возможность коррекции светового потока, который изменяется при изменении температурного режима оптических излучателей. Получаемые результаты сенсорного контроля сопровождаются информацией об их достоверности, что составляет функцию самоаттестации сенсорной системы.

#### **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 LM1117IMPX-5.0 и LM1117IMPX-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 LM1117IMPX-5.0: 4,8–5,2 В, для LM1117IMPX-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.



a)



b)

Рис. 5. Схема подключения микроконтроллера (а) и источника вторичных напряжений сенсорной системы (б)

### 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 светодиодов имеет сильную зависимость от температуры, поэтому используется обратная связь в виде дополнительного фотодиода, позволяющего контролировать 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 цветоцветового контроля.

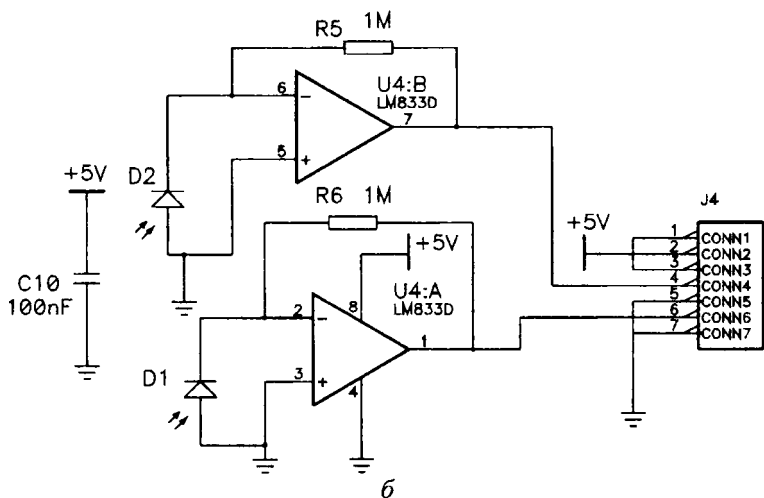
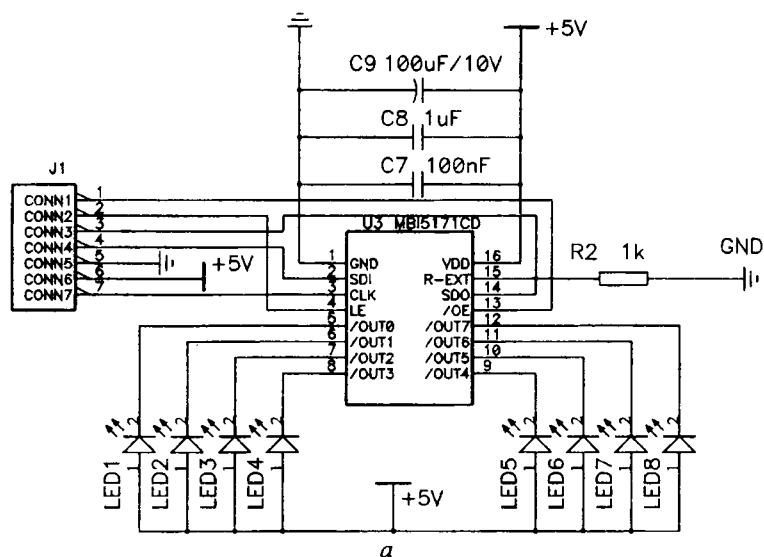


Рис. 6. Схема управления светодиодными импульсами (а) и обработки выходных сигналов фотоприемника (б)

### Блок приема отраженных световых импульсов

Данный блок состоит из фотодиода и подключенной к нему микросхемы операционного усилителя LM833D. Операционный усилитель включен по схеме преобразования тока в напряжение. Указанная микросхема состоит из двух операционных усилителей, один из которых используется в связке с фотодиодом, принимающим импульсы, излучаемые светодиодом, а второй — в связке с фотодиодом, принимающим отраженные оптические импульсы. Микросхема характеризуется достаточно высоким коэффициентом усиления — 110 дБ и низким уровнем шума — 4,5 нВ.

### **Блок управления и обработки данных**

Указанный блок содержит микроконтроллер С8051F121, который выполняет следующие функции: управление световыми импульсами и их коррекцию; прием и хранение оцифрованного значения отраженных импульсов; диагностику чувствительных элементов; обработку данных и формирование результатов; аттестацию результатов контроля; прием и передачу данных по интерфейсу RS-232.

#### **Алгоритм функционирования интеллектуального сенсорного модуля.**

После включения питания микроконтроллер приступает к инициализации, которая заключается в увеличении его тактовой частоты за счет использования встроенной системы автоподстройки. Элементом стабилизации частоты тактового сигнала служит кварцевый резонатор с частотой 11059200 Гц. После настройки генератора микроконтроллер выполняет настройку периферийных модулей, а затем переходит в режим ожидания новой команды. Каждые 50 мкс переопределение 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 хранится 64 значения.

Если микроконтроллер получает команду **провести поверку модуля**, он выполняет следующие действия:

- 1) включает режим поверки прибора;
- 2) ожидает окончания поверки;
- 3) усредняет полученные данные;
- 4) записывает результаты во Flash-память.

При получении команды **определить тип почвы** микроконтроллер производит следующее:

- 1) вычисляет среднее значение коэффициента яркости на определенной спектральной линии;
- 2) определяет коэффициент вариации показателя отражения почвы;
- 3) среднее значение и коэффициент вариации заносит в память;
- 4) проводит проверку вычисления средних значений коэффициента яркости и коэффициентов вариации; переходит к п. 1, если вычисления не выполнены;
- 5) вычисляет евклидово расстояние от исследуемого значения до соответствующей табличной величины; устанавливает достоверность результата;
- 6) сравнивает величину евклидова расстояния с его минимальным значением; переходит к выполнению п. 8, если полученная величина больше минимального значения;
- 7) записывает номер почвенного образца и евклидово расстояние как минимальное;
- 8) проверяет на окончание чтения таблицы с параметрами почв; переходит в п. 5, если чтение таблицы не закончено;
- 9) определяет достоверность результата (при его зависимости от температуры);
- 10) записывает в буфер передатчика свой адрес, адрес получателя, тип почвы, достоверность результата, CRC.

### **Опыт применения разработанной сенсорной системы для цветоцветового контроля почвы**

Конструктивно интеллектуальная сенсорная система выполняется в виде унифицированного модуля, который встраивается в заглубляемый в почву механизм

сельскохозяйственного агрегата с целью совмещения процедуры мониторинга почвы с проведением технологической операции. Сенсорный контроль осуществляется также с помощью разработанной автономной мобильной системы в виде прицепного устройства к мини-трактору. Кроме того, модификацией конструкции интеллектуальной сенсорной системы является малогабаритное устройство для фермерских хозяйств и индивидуальных предпринимателей.

### Лабораторные исследования

Для экспериментального исследования способа светоцветового контроля почвы в лабораторных условиях разработано устройство, представляющее собой механизм для плавного перемещения оптического сенсорного модуля над почвенным образцом и состоящее из шагового электродвигателя, обеспечивающего передвижение оптического модуля по направляющим, и элементов передачи движения к данному модулю (рис. 7). Управление механизмом перемещения и осуществление его связи с электронно-оптическим блоком производится с помощью микроконтроллера AT Mega 16. Выбор шагового электродвигателя в качестве электропривода дискретного действия в разработанном устройстве обусловлен его существенными достоинствами: такой двигатель дает возможность преобразовывать унитарный код (последовательность импульсов) в пропорциональное перемещение механизма.

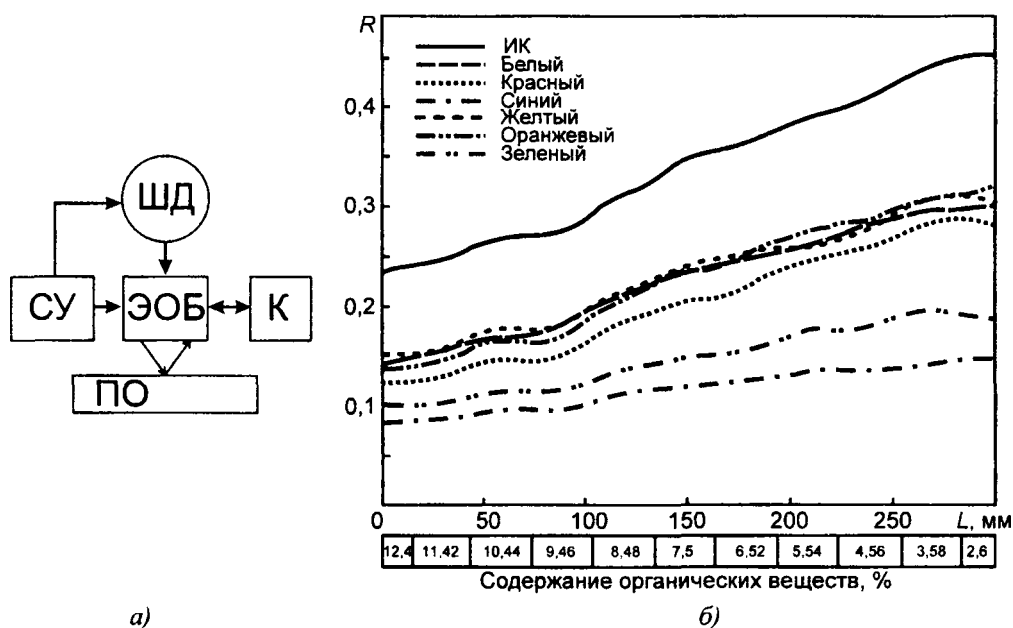


Рис. 7. Структурная схема экспериментального устройства для исследования способа светоцветового контроля почвы (а) и зависимость коэффициента яркости почвенного образца от содержания органических веществ (б): ЭОБ — электронно-оптический блок; К — компьютер; ПО — почвенные образцы; ШД — шаговый двигатель; СУ — схема управления шаговым двигателем

Динамический светоцветовой контроль почвы с использованием данной многоканальной сканирующей сенсорной системы осуществляется следующим образом. С компьютера на сенсорный блок передается команда запуска измерений, сенсорный блок включает светодиоды, передает команду о начале измерений на схему управления шаговым двигателем и начинает съем информации. Схема управления шаговым двигателем после получения информации о начале измерений производит коммутацию обмоток двигателя в необходимом для передвиже-

ния сенсорного блока порядке. После перемещения сенсорного блока на заданную величину схема управления формирует сигнал об окончании цикла измерений и передает его на сенсорный блок, при этом прекращается съем информации. Продолжительность процедуры динамического контроля почвенного образца составляет 30 с (144 значения амплитуды 8 информационных импульсов длительностью по 10 мс с временными промежутками между импульсами по 5 мс).

Почвенный образец представляет собой кювету, заполненную смесью почв с заранее известным содержанием органических веществ и определенной влажностью (~1–2%). Для подготовки почвенных образцов использовались следующие типы почв:

- темно-серая почва, содержащая 12,4% органических веществ и включающая сравнительно крупные частицы сложной формы, вероятнее всего органического происхождения;
- светло-желтая почва, содержащая 2,6% органических веществ, имеющая в своем составе как крупные частицы округлой формы, так и значительное количество мелких частиц.

Зависимости коэффициента яркости от положения электронно-оптического блока над поверхностью почвенного образца представлены на рис. 3. Наибольшие значения коэффициента яркости характерны для ИК-излучения, наименьшие — для синего света, причем все цветовые диапазоны в порядке уменьшения  $R$  располагаются в следующий ряд: ИК-излучение, оранжевый и желтый свет, белый, красный, зеленый, синий свет. Коэффициент яркости почвы наиболее плавно увеличивается с уменьшением содержания в ней органических веществ от 12,4% до 9,46 % и более резко возрастает при уменьшении этого параметра почвы с 9,46 % до 2,6 %. Указанная зависимость  $R$  от содержания органических веществ характерна для всех цветовых диапазонов оптического излучения, используемых в процессе диагностики почвы.

### **Полевые испытания**

Конструкция разработанной мобильной сенсорной микросистемы для использования в качестве навесного механизма к мини-трактору показана на рис. 8. Электронно-оптический модуль сенсорной микросистемы соединен с блоком регистрации и координатной привязки, который осуществляет запись получаемых результатов и географические координаты точки контроля. Здесь же представлен фрагмент временной последовательности данных в виде коэффициентов яркости почвы для разных спектральных точек видимого диапазона. Разные каналы записи представленных данных соответствуют измеряемым параметрам при освещении почвы оптическим излучением разного цвета.

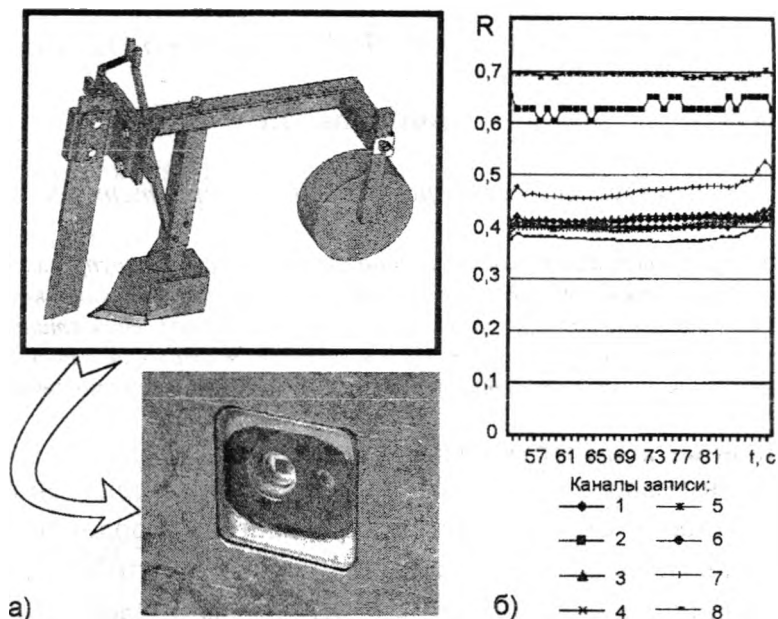


Рис. 8. Внешний вид сенсорной микросистемы для светоцветового контроля почвы (а) и фрагмент временной последовательности данных с ее выхода (б)

Оснащение разработанной мультисенсорной системы средствами автоматической навигации позволяет выполнять контроль параметров почвы с определенной периодичностью, производить привязку формируемого информационного образа почвы к координатам местности, заносить в память результаты контроля, а также долготу и широту каждой точки контроля. Механика системы дает возможность выдерживать заданную величину заглубления в течение всего процесса диагностики почвы, то есть «копировать» поверхность почвы. Глубина контроля регулируется исходя из особенностей строения профиля почвы и залегания ее гумусово-аккумулятивного горизонта.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Колешко В. М., Гулай А. В., Лученок С. А. Светоцветовой метод эволюционной диагностики почв для технологии точного земледелия // Теоретическая и прикладная механика: межведомств. сб. научно-методических статей. — 2006. — Вып. 20. — С. 198–208.
2. Колешко В. М., Гулай А. В., Лученок С. А. Формирование светоцветового информационного образа почвы в технологии точного земледелия // Теоретическая и прикладная механика: научно-технический международный журнал. — 2007. — Вып. 22. — С. 279–286.