

УДК 630*79:65.011.56+674.093:65.011.54/56

UDC 630*79:65.011.56+674.093:65.011.54/56

**ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ И
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО,
ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ ПРО-
ЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ
АВТОМАТИЗАЦИИ ВОЖДЕНИЯ
ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ НА ЛЕСНЫХ
ПИТОМНИКАХ**

**FEATURES OF DEVELOPMENT AND USE OF
MATHEMATICAL AND TECHNICAL SUPPORT
FOR DESIGN OF AUTOMATION SYSTEMS FOR
DRIVING TRACTOR UNITS FOR FOREST
NURSERIES**

Петровский Владислав Сергеевич
д.т.н., профессор

Petrovskiy Vladislav Sergeevich
Dr.Sci.Tech., professor

Хмелик Сергей Георгиевич
инженер
*Воронежская государственная лесотехническая
академия, Воронеж, Россия*

Khmelik Sergey Georgievich
engineer
*Voronezh State Academy of Forestry and Technologies,
Voronezh, Russia*

Рассмотрены решения задач по синтезу систем ав-
томатизации вождения тракторных агрегатов на
лесных питомниках, обеспечивающих выполнение
без участия человека всей последовательности опе-
раций выращивания лесопосадочного материала

The problems related to the synthesis of automation
systems of driving tractor units in forest nurseries that
provide performance without human intervention
throughout the sequence of operations of tree planting
material growing are examined

Ключевые слова: ЛЕСНЫЕ ПИТОМНИКИ, ТРАК-
ТОРНЫЕ АГРЕГАТЫ, АВТОМАТИЗАЦИЯ ВО-
ЖДЕНИЯ, УСТОЙЧИВОСТЬ И БЫСТРОДЕЙ-
СТВИЕ, ПРОГРАММА ВОЖДЕНИЯ, ОРИЕНТА-
ЦИОННЫЕ СЕТИ, РУЛЕВОЙ ПРИВОД

Keywords: FOREST NURSERY, TRACTOR UNITS,
DRIVING AUTOMATION, STABILITY AND PER-
FORMANCE, DRIVING PROGRAM, ORIENTA-
TION NETWORK, STEERING LINKAGE

Обоснование актуальности

При работе тракторных агрегатов на лесных питомниках качество и эффективность выполнения операций по посеву семян, рыхлению, прополки междурядий, подрезки корней сеянцев, выкопки посадочного материала главным образом определяются точностью вождения тракторов с навесными почвообрабатывающими орудиями. При обычном ручном управлении точность вождения между рядками сеянцев зависит от профессиональных навыков тракториста, и не обеспечивает достаточную точность автовождения тракторных агрегатов на лесных питомниках. При автоматическом вождении тракторных агрегатов должна обеспечиваться заданная точность движения агрегатов, не зависящая от индивидуальных способностей тракториста и от влажности почвы [2].

Постановка и решение задачи

Аппаратура управления системы автоматического вождения – САВ должна включать в себя чувствительные элементы – датчики, воспринимающие положение заданной траектории движения, электронную аппаратуру обработки сигналов датчиков и формирования управляющих воздействий для исполнительного привода рулевого управления, исполнительный рулевой привод и устройства стабилизации движения колесного тракторного агрегата. Система автоматического вождения предназначена для автоматического направления движения тракторного агрегата по заданной траектории без участия водителя в технологических процессах лесных питомников. Принцип работы системы автоматического вождения заключается в образовании замкнутой следящей системы, включающей тракторный агрегат как объект управления. Такое устройство обладает свойством автоматически компенсировать отклонения рабочих органов агрегатов от заданной траектории движения, соответствующим образом воздействуя на рулевое управление трактора [2].

В зависимости от способа задания траектории движения, системы автоматического вождения можно разделить на копирующие, индукционные, оптические и программные. Копирующая САВ работает по принципу копирования трактором с навесными орудиями при своем движении механически заданной линии. Эта линия имеет вид хорошо различимой на местности борозды, по ней скользит специальный щуп – копир системы автовождения, соединенный с управляющим устройством. При отклонении машины, копир через управляющее устройство вырабатывает сигнал коррекции направления движения машины в нужную сторону. Как правило, в копирующих САВ направляющая борозда формируется при предыдущем проходе тракторного агрегата с помощью специального маркера или в качестве нее используется кромка вспаханного поля лесного питомника, при работе агрегата на пахоте. Эта система характеризуется значительными

погрешностями. Принцип работы индукционной система основан на ориентации движущегося агрегата относительно токнесущего проводника. По проводнику, расположенному рядами на глубине 40 см и задающему траекторию движения, пропускают переменный ток, в результате – около трассы движения образуется определенным образом ориентированное электромагнитное поле. Посредством индукционных датчиков, закрепленных на тракторном агрегате, напряженность и поляризация этого поля преобразуются в электрические сигналы, поступающие на управляющее устройство. По уровню этих сигналов определяется положение агрегата и направление его движения относительно задающего проводника. В результате аппаратура управления формирует необходимые задающие воздействия, направляя агрегат по заданной траектории – по закопанному проводнику. В основу работы оптической системы положен принцип управления агрегатом по контрастной линии. Для этой цели по оси трассы или параллельно ей наносится контрастная линия, имеющая существенно отличные оптические свойства по сравнению с окружающей местностью. Аппаратура САВ с помощью приемных фотодатчиков воспринимает изображение этой линии и определяет положение машины относительно заданной траектории. При наличии отклонения – система вырабатывает корректирующие управляющие воздействия на рулевое управление трактора, направляя тем самым движение агрегата параллельно контрастной линии. Надежность, долговечность таких систем для лесных питомников не подходит по ряду причин.

Следовая САВ по принципу действия совпадает с оптической системой вождения. Трасса движения машины определяется следом, обладающим специфическими свойствами, позволяющими надежно различать его на местности по магнитным, химическим или радиационным признакам.

Аппаратура автовождения должна быть снабжена соответствующими чувствительными элементами, воспринимающими положение этого

следа и формирующими сигналами для управляющего устройства, которое посредством исполнительного рулевого привода изменяет направление движения агрегата, направляя ее по заданной траектории. Эта система также имеет ряд серьезных недостатков. При работе с программной САВ машина не «видит» трассу движения, а выполняет все необходимые маневры согласно команд управления, поступающих с задающего программного устройства. В это устройство перед началом движения вводятся координаты исходных точек и координаты конечного пункта. Промежуточные точки служат для периодической коррекции ошибок в траектории движения и необходимы для повышения надежности работы системы. Запись программы движения может производиться автоматически. Система сложная в эксплуатации для условий работы в лесных питомниках. САВ тракторных агрегатов на лесных питомниках должна обеспечивать высокую точность управления во всем диапазоне рабочих скоростей движения тракторного агрегата. В течение одного и последующих технологических циклов выращивания сеянцев необходимо сохранение неизменности траекторий движения тракторного агрегата. В наибольшей степени указанным требованиям соответствует САВ индукционного типа. При подземной закладке ориентирующих проводов, индукционная система вождения позволяет автоматизировать вождение тракторного агрегата на всех технологических операциях выращивания посадочного материала, включая вспашку почвы. Параллельные ряды проводов в пластиковой изоляции сохраняются в почве 20 лет. Точность автоматического вождения определяется параметрами и схемой управляющего устройства и практически не зависит от внешних погодных воздействий. Система автоматического вождения тракторных агрегатов на лесных питомниках должна строиться по типичной для следящих систем схеме. Задающее воздействие от токонесущего проводника подается в сравнивающий элемент, куда одновременно поступает выходной сигнал положения тракторного агрегата в противоположной по-

лярности. Образующийся разностный сигнал подается на вход управляющего устройства, формирующего регулирующее воздействие на рулевой привод. В результате система движется в направлении уменьшения величины рассогласования между выходным сигналом тракторного агрегата и задающим воздействием токонесущего проводника. Таким образом, движение трактора повторяет задающее воздействие токонесущего проводника.

Структурная схема главной цепи САВ приведена на рисунке 1.

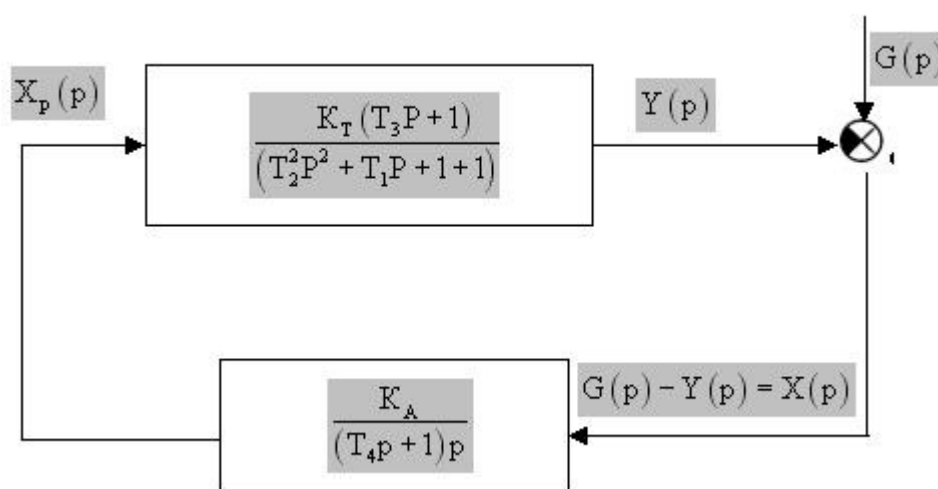


Рисунок 1. Структурная схема главной цепи САВ

Обозначения на схеме: $Y(p)$ – изображение по Лапласу реальной траектории движения трактора; $G(p)$ – изображение задающего воздействия траектории токонесущего проводника; K_T – коэффициент передачи;

$\frac{Y(p)}{X_p(p)} = \frac{(T_3p+1)K_T}{(T_2^2p^2+T_1p+1)p^2}$ – передаточная функция тракторного агрегата как

объекта управления; $\frac{X_p(p)}{X(p)} = \frac{K_A}{(T_4p+1)p}$ – передаточная функция управляющего устройства с коэффициентом передачи K_A ; $X(p) = G(p) - Y(p)$ – изображение по Лапласу ошибки автовождения; $X_p(p)$ – изображение по

Лапласу регулирующего воздействия регулятора на тракторный агрегат.

Как объект управления, колесный трактор с навесным оборудованием представляет собой апериодическое звено второго порядка с астатизмом второго порядка и переменными параметрами (T_1, T_2, T_3) , находящимися в сложной функциональной зависимости от скорости движения. Управляющее устройство с электромеханическим исполнительным рулевым приводом представляет собой апериодическое интегрирующее звено первого порядка. Параметры K_A, T_4 зависят от технических характеристик управляющего устройства.

Передаточная функция системы в замкнутом состоянии:

$$W(p) = \frac{(T_3 p + 1) K_T K_A}{(T_4 p + 1)(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)(T_3 p + 1) K_T K_A} = \frac{Y(p)}{G(p)}. \quad (1)$$

Характеристическое уравнение главной цепи замкнутой системы:

$$T_2^2 T_4 p^6 + (T_1 T_4 + T_2^2) p^5 + (T_4 + T_1) p^4 + p^3 + T_3 K_T K_A p + K_T K_A = 0. \quad (2)$$

Уместно заметить, в характеристическом уравнении коэффициент перед p^2 равен нулю, что свидетельствует о структурной неустойчивости системы. Это значит, что при любом значении параметров данная система автоведения неработоспособна. Для обеспечения устойчивости, в систему вводится стабилизирующая жесткая обратная связь, охватывающая объект управления. В результате получим скорректированную структурную схему главной цепи, которая показана на рисунке 2.

Передаточная функция скорректированной замкнутой САВ:

$$W(p)_3 = \frac{K_T K_A (T_3 p + 1)(T_5 p + 1) + (T_2^2 p^2 + T_1 p + 1) p^2 K_C K_A}{(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)(T_4 p + 1) p^3 + K_T K_A (T_3 p + 1)(T_5 p + 1) + (T_2^2 p^2 + T_1 p + 1) p^2 K_C K_A} = \frac{Y(p)}{G(p)} \quad (3)$$

Характеристическое уравнение скорректированной САВ:

$$T_4 T_2^2 p^6 + (T_1 T_4 + T_2^2) p^5 + (T_1 + T_4 + K_C K_A T_2^2) p^4 + K_C K_A T_1 p^3 + (K_T K_A T_3 T_5 + K_C K_A) p^2 + K_T K_A (T_3 + T_5) p + K_A K_T = 0. \quad (4)$$

Введение жесткой обратной связи, охватывающей объект управления, обеспечило системе структурную устойчивость. Схема главной цепи,

приведенная на рисунке 2, взята за основу при разработке САВ. Исходная схема линейной САВ может служить лишь для приближенных расчетов основных характеристик управляющего устройства.

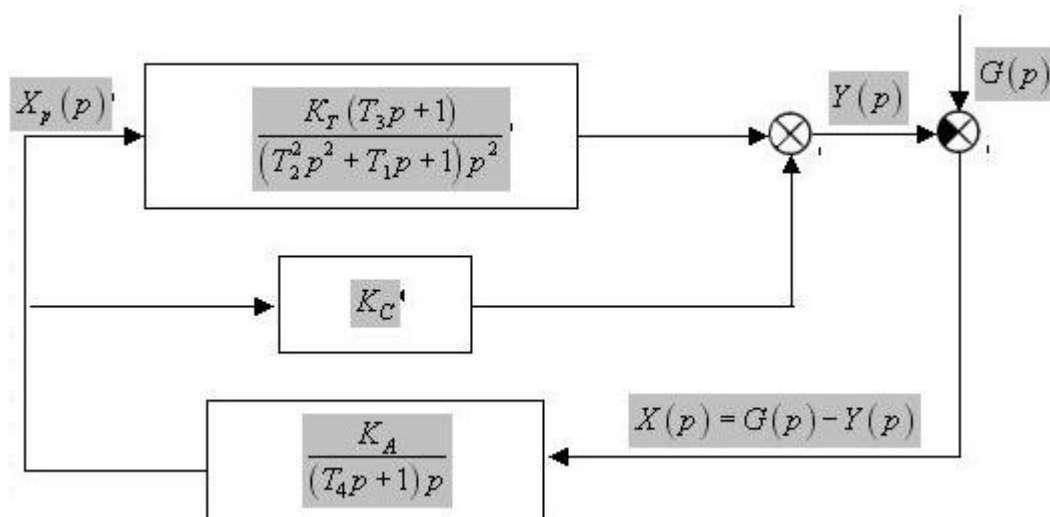
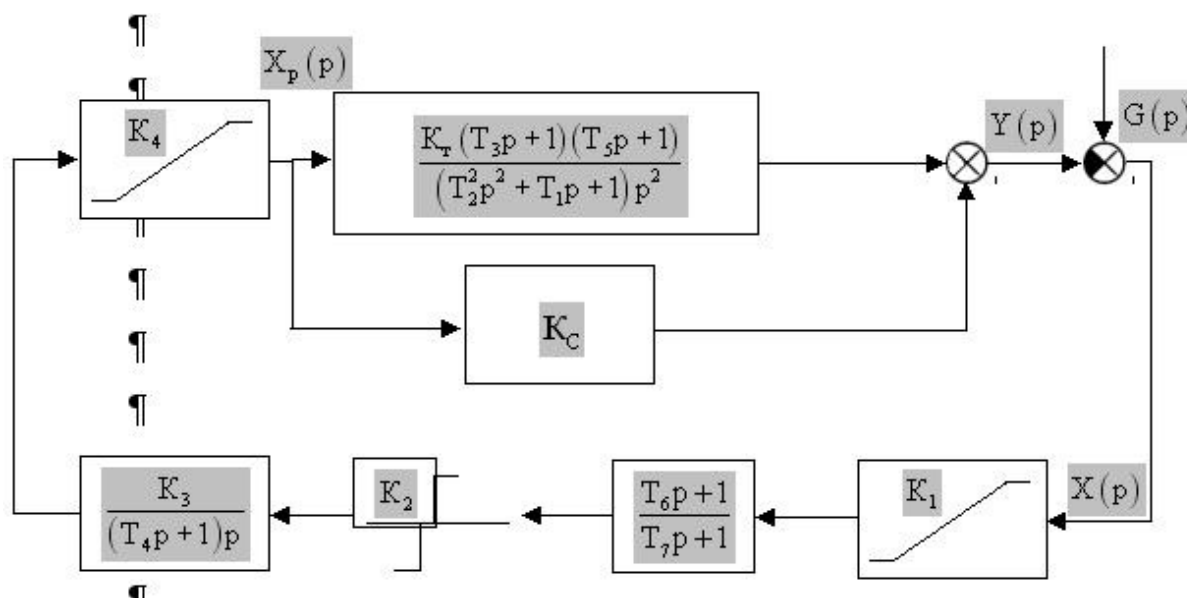


Рисунок 2. Скорректированная структурная схема главной цепи САВ

Реальная система содержит ряд корректирующих звеньев, являясь поэтому, нелинейной системой. Нелинейные звенья системы: механизм рулевого управления с нелинейностью типа ограничения по углу поворота управляемых колес, усилитель мощности устройства управления обладает нелинейностью релейного типа с зоной нечувствительности, входные усилители сигналов датчиков имеют нелинейность типа ограничение по амплитуде выходного сигнала. Чтобы компенсировать негативное влияние зоны нечувствительности релейного звена и обеспечить повышение устойчивости системы за счет опережения по фазе переключения, перед релейным звеном вводится пропорционально- дифференцирующее звено $\frac{T_6p+1}{T_7p+1}$.

Полная структурная схема САВ тракторным агрегатом изображена на рисунке 3. Качество системы автоматического вождения определяется точностью работы в установившемся режиме, динамическим забросом и длительностью переходных процессов, запасом устойчивости по фазе и амплитуде.

Технические требования к САВ установлены исходя из достигнутых лучших показателей точности вождения тракторных агрегатов на лесных питомниках. В результате проведенных нами экспериментальных исследований точности ручного вождения агрегатов на питомниках установлено, что ошибки ручного управления колесным тракторным агрегатом лежат в пределах $\pm 6-12$ см. По результатам натурных экспериментов получены технические характеристики САВ индукционного типа: Погрешность автоматического вождения – ± 2 см. Диапазон скоростей вождения – 0,3-2,5 м/с. Длительность переходных процессов в системе при скачкообразном задающим воздействии – не более 3 с.



Поскольку для этой линеаризованной следящей системы характерна работа при малой величине рассогласования, в достаточно точных расчетах ее считаем как линейную систему. Величина установившейся ошибки в системе автоматического вождения имеет вид:

$$X_g(p) = \frac{(T_4p + 1)(T_2^2 p^2 + T_1p + 1)p^3 G(p)}{(T_4p + 1)(T_2^2 p^2 + T_1p + 1)p^3 + K_t K_A (T_3p + 1)(T_5p + 1) + (T_2^2 p^2 + T_1p + 1)p^2 K_c K_A}. \quad (5)$$

Подстановкой в выражение установившейся ошибки изображений

различных видов задающих воздействий $G(p)$ и приравнивая затем оператор дифференцирования $p=0$, получим значение установившейся ошибки системы автовождения. Например, при скачкообразном ступенчатом управляющем воздействии $G(p)=\frac{a}{p}$ установившаяся ошибка системы $X(p)_g=0$. Также, при изменяющемся задающим воздействии $G(p)=\frac{a}{p^2}$ установившаяся ошибка автоматического вождения $X(p)_g=0$. Принципиально, данный тип следящей системы обладает чрезвычайно высокой точностью работы, обеспечивая нулевую ошибку в установившихся режимах. Параметры элементов системы могут оказать влияние лишь на запасы устойчивости и длительность переходных процессов. Поскольку признак структурной устойчивости системы является обязательным, но недостаточным, чтобы судить о поведении реальной системы, выполняется расчет устойчивости САВ по ее линейной части с помощью частотного критерия Михайлова [1]. Основная цель расчета – определить диапазон изменения параметров элементов системы, при которых она работоспособна. Для этого, в характеристическом уравнении системы в замкнутом состоянии оператор дифференцирования p заменим на $j\omega$ и выполним разделение характеристического полинома $D(j\omega)$ на вещественную и мнимую части:

$$D(j\omega) = -a\omega^6 + jb\omega^5 + c\omega^4 - jd\omega^3 - e\omega^2 + jf\omega + k.$$

$$Re(j\omega) = k - e\omega^2 + c\omega^4 - a\omega^6. \quad (6)$$

$$Im(j\omega) = f\omega - d\omega^3 + b\omega^5.$$

Коэффициенты a, b, c, d, e, f и k есть соответствующие коэффициенты перед степенями оператора p в характеристическом уравнении.

Поскольку трактор, как объект управления, является звеном с переменными по скорости параметрами, расчет выполнен методом замороженных точек для 12 дискретных значений скорости агрегата, охватывающих

диапазон от 0,3 до 6,0 м/с. В результате расчетов, выполненных на ЭВМ получены координаты точек кривых Михайлова, характеризующих поведение САВ при различных значениях скорости движения агрегата. Если кривая Михайлова охватывает на комплексной плоскости характеристического полинома при движении против часовой стрелки число квадрантов, равных порядку системы, то она устойчива [2]. Для двух типов исполнительных рулевых механизмов с номинальной скоростью вращения 1,88 рад/с – (0,3 об/с) и 4,5 рад/с – (0,7 об/с), для обеспечения устойчивости САВ необходим коэффициент жесткой стабилизирующей обратной связи, охватывающей объект управления, равный 1,0 и 0,6 соответственно. Задача определения оптимальных параметров управляющего устройства усложняется тем, что, тракторный агрегат является объектом с переменными параметрами, находящимися в сложной функциональной зависимости от скорости движения. Отсюда – два варианта исполнения управляющего устройства – с переменными параметрами, перестраиваемыми соответственно изменению параметров объекта управления. И управляющее устройство с постоянными параметрами, удовлетворяющими заданным критериям качества управления в рабочем диапазоне скоростей движения агрегата. При разработке САВ необходимо ориентироваться на систему с постоянными параметрами регулятора (управляющего устройства), как более простую по конструкции, следовательно, более надежную.

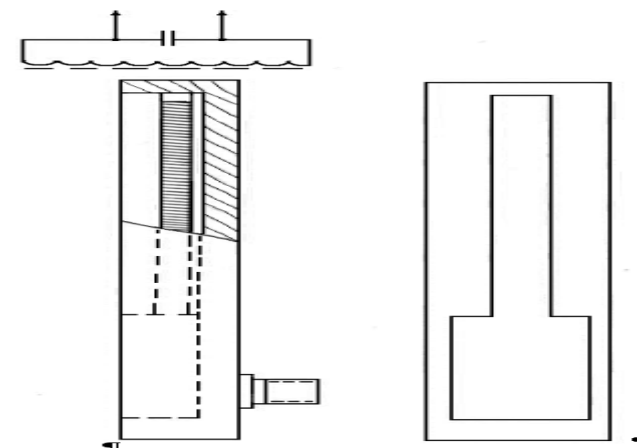


Рисунок 4. Схема и конструкция датчиков

Расчет оптимальных параметров управляющего устройства САВ выполняется по уточненной функциональной схеме с учетом нелинейности звеньев. Расчет переходных характеристик проводился для 13 значений скорости агрегата, 3 различных коэффициентов стабилизирующей обратной связи, 3 значениях скорости исполнительного рулевого привода и 3 уровнях скачкообразного ступенчатого задающего воздействия. В результате произведен анализ 351 варианта переходного процесса САВ при всех сочетаниях указанных параметров. Анализ переходных процессов позволяет определить параметры управляющего устройства, удовлетворяющие заданным требованиям к качеству автоматического вождения в рабочем диапазоне скоростей агрегата. Получены параметры оптимального управляющего устройства для лесохозяйственных тракторов [2]: выходная скорость исполнительного привода – 4,5 рад/с; коэффициент стабилизирующей обратной связи – $0,8 \div 1,0$; величина зоны нечувствительности по датчику отклонения – $\pm 1,0$ см. Электромагнитное поле ориентирующего провода, задающего траекторию движения тракторного агрегата, воспринимается посредством индукционных датчиков (рисунок 4). Датчики обладают острой диаграммной направленностью, с тем, чтобы возможно более точно фиксировать положение задающего проводника с током. В наибольшей степени таким требованиям отвечают датчики типа магнитных антенн, выполненных на магнитопроводах с большим отношением длины к поперечному сечению. Для большей помехоустойчивости и повышения амплитуды выходного сигнала, датчики должны выполняться настроенными на частоту ориентирующего тока в проводе. Волновое сопротивление датчиков, с целью лучшего согласования их с входом полупроводникового усилителя составляет 1,5 килоОм, частота тока в ориентирующем проводе 10 кгц.

В состав управляющего устройства САВ входят: индукционные датчики – приемники электромагнитного поля, электронный блок, содержащий усилители сигналов датчиков, фазовый детектор, формирователи ко-

манд управления, усилители мощности и преобразователь напряжения, исполнительный электромеханический привод рулевого управления. Рулевой привод САВ выполнен на базе электродвигательного механизма. Крутящий момент с выходного вала механизма на вал рулевого колеса трактора передается посредством зубчатой передачи через фрикционную муфту ограничения крутящего момента. Благодаря этой муфте тракторист может непосредственно вмешиваться в работу системы автовождения даже не выключая аппаратуры управления, простым пересиливанием рулевого привода. Такой способ подсоединения рулевого механизма выбирается ввиду высокой универсальности, применительно к различным типам тракторных агрегатов. Вся аппаратура управления размещается в кабине трактора и питается от его бортовой электросети. Мощность, потребляемая аппаратурой управления при включении исполнительного привода 80 ватт.

Оценка эффективности

Экспериментальный образец системы автовождения колесных тракторных агрегатов прошел пробную проверку на двух лесных питомниках и показал позитивные результаты: погрешность автоматического вождения ± 2 см; примерный диапазон скоростей вождения 0,3 – 2,5 м/с, длительность переходных процессов менее 3 с.

Заключение

Разработанная система автовождения колесных тракторных агрегатов на лесных питомниках после совершенствования с использованием микроконтроллеров и средств цифровой автоматики обеспечивает внедрение в практику лесного хозяйства перспективных систем автоматизации выращивания лесопосадочного материала.

Литература

1. Петровский В.С. Теория автоматического управления: Учеб. пособие. Воронеж: ВГЛТА, 2010. – 247 с.
2. Петровский В.С. Автоматизация технологических процессов и производств лесопромышленного комплекса: Учеб. для вузов. Воронеж: ВГЛТА, 2011. – 400 с.