

ВЗГЛЯД ИЗНУТРИ

СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Букреев И. А., ООО «Геостройизыскания»,
Жданов А. В., к.т.н., Topcon Positioning Systems

Системы автоматического управления строительной техникой находят все более широкое распространение в нашей стране. Зачастую специалистов интересует, каким же образом устроены и как работают эти системы. В данной публикации описываются принципы построения и работы систем автоматического нивелирования на примере продукции компании Topcon Positioning Systems (США).

Основная цель системы нивелирования – определение позиции и ориентации рабочего органа строительной машины относительно проектной поверхности, а затем автоматическое перемещение рабочего органа в соответствии с ней. Системы используются для точного выноса поверхности «в натуру» при строительстве фундаментов зданий, автомобильных и железных дорог, каналов, аэродромов и т. п. Использование систем позволяет увеличить производительность машины (увеличение скорости прохода, работа в условиях плохой видимости, избежание простоя из-за ручной нивелировки участка, снижение числа проходов), экономить топливо, а также уменьшить расход стройматериалов за счет снижения допуска по толщине. В зависимости от комплектации системы могут использоваться на асфальто- и бетоноукладчиках, фрезях, бульдозерах, автогрейдерах, экскаваторах и других строительных машинах.

Работа системы нивелирования основывается на определении текущего высотного положения и ориентации кромки рабочего органа строительной машины, и их сравнении с опорной поверхностью, задающей проектный уровень формируемого слоя (см. блок-схему на рис. 1). Положение рабочего органа относительно опорной поверхности определяется с помощью различных датчиков, закрепленных на конструктивных частях машины, в результате совместной обработки их измерений. Датчики подвержены влиянию различного рода ошибок измерений, которые необходимо отфильтровать для повышения точности. Затем производится сравнение измерений с опорной поверхностью, на основе которого рассчитывается управление. Обработка сигналов с датчиков и вычисление управления по заложенному алгоритму происходят в блоке управления (контроллере), устанавливаемом в кабине машины. Графическая визуализация – на дисплее, также устанавливаемом в кабине. Кроме этого, возможен вариант, когда контроллер и дисплей конструктивно совмещены в едином модуле.

Опорными поверхностями для вычисления относительного положения рабочего органа могут служить цифровые математические модели конструктивных слоев создаваемых трасс, площадок, других строительных объектов, передаваемые в контроллер. Также возможно использовать физические и искусственные поверхности и линии. В качестве примера физической поверхности можно привести слой дорожного полотна, предшествующий текущему укладываемому слою. Искусственные поверхности создаются лазерными построителями, линии – струнами, натягиваемыми по кольшкам. Управление, формируемое контроллером, подается на гидрораспределитель, который управляет гидроцилиндрами, изменяющими положение рабочего органа машины. Машина, гидроцилиндры и гидрораспределители подвержены влиянию различных, в общем случае неизвестных, динамических и статических возмущений. Основными из них являются влияние подстилающей поверхности на шасси машины и неидеальность гидропривода. Для получения наиболее качественного управления возмущения учитываются при выборе конфигурации и характеристик датчиков, в алгоритме обработки их измерений и расчете управления. Принципиальным является наличие замкнутой петли, выделенной на рис. 1

жирными стрелками. В литературе подобные системы называются системами с обратной связью. В качестве примера системы управления строительной машиной на рис. 2 приведен общий вид автогрейдера с установленной на нем системой управления на базе спутниковой навигационной системы.

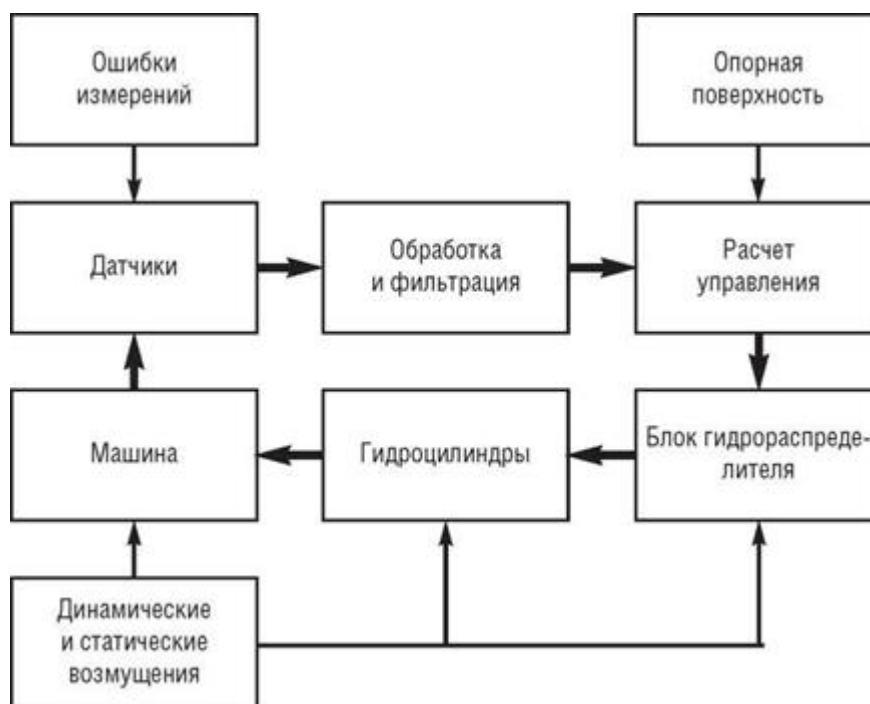


Рис. 1. Общая блок-схема системы управления строительной машиной с обратной связью

Основными датчиками для вычисления позиции и ориентации рабочего органа машины являются: датчик поперечного угла наклона рабочего органа, датчик продольного угла наклона машины, датчик поворота рабочего органа, инерциальный измерительный модуль, ультразвуковой датчик, лазерный датчик приемник, оптическая призма, спутниковая навигационная антенна. Датчики применяются в различных конфигурациях в зависимости от конструктивных особенностей оснащаемой ими машины и сложности стоящих задач.

Датчики поперечного и продольного углов наклона, датчик поворота базируются на электронном измерительном модуле. Датчики имеют прочный литой корпус и крепятся на части машины с помощью специальных крепежных приспособлений, имеющих индивидуальную конструкцию для различных моделей машин. Измерительный модуль имеет полностью герметичное исполнение, что позволяет использовать датчики в тяжелых условиях в диапазоне температур от -40 до $+80$ градусов. Вывод информации и подача питания на датчики происходят с помощью соединительных разъемов с защитой от проникновения влаги. Обмен данными между контроллером и датчиками происходит по сетевым интерфейсам типа CAN или RS485 с помощью соединительных кабелей. Информация с датчиков совместно с линейными измерениями рабочего органа и частей машины позволяет контроллеру вычислить точное взаимное угловое положение с опорной поверхностью при любом положении машины в течение ее работы на строительном участке. Измерительный модуль датчика угла наклона представляет собой осесимметричную заполненную электролитом стеклянную или керамическую ампулу, в которой установлены металлические электроды. Электроды выведены наружу ампулы в виде токовыводящих контактов. При наклоне изменяется степень погружения электродов в электролит, что приводит к изменению электрической емкости заполненных электролитом межэлектродных полостей. Указанные изменения отслеживаются платой преобразователя,

которая вырабатывает электрические напряжения, пропорциональные углам наклона основания ампулы, и далее после оцифровки встроенный микропроцессор формирует сообщения, передаваемые по вышеприведенным интерфейсам.



Рис. 2. Автогрейдер, оснащенный системой автоматического нивелирования Topcon 3D GPS/GLONASS

Работа измерительного модуля датчика поворота основывается на потенциометре (переменном резисторе). На его общее сопротивление подается определенное напряжение, а при помощи подвижного ползунка снимается его часть, по значению которой преобразователь вычисляет угол смещения ползунка из крайнего положения, а соответственно, и угол поворота рабочего органа машины. Далее производится обработка, подобная описанной выше.

В инерциальном измерительном модуле (рис. 3) используются акселерометры, гироскопы (датчики угловой скорости) и магнитометры. Все компоненты в модуле трехосевые. Первые два прибора выполнены по микроэлектронно-механической технологии с подвижной пробной массой, перемещение которой приводит к изменению емкости. Каждая из осей акселерометра измеряет проекцию ускорения в виде суммы динамической составляющей и ускорения силы тяжести на основе измерения смещения пробной массы из состояния равновесия. Ось гироскопа измеряет проекцию угловой скорости на основе измерения силы Кориолиса, влияющей на пробную массу при ее вращении. Оси магнитометра выполнены из магниторезистивного материала, меняющего сопротивление в зависимости от проекции магнитного поля Земли. Инерциальный модуль используется вместо датчиков наклона и позволяет снизить влияние ускорения при движении и поворотах машины, искажающего измерения электролитных датчиков. Магнитометр в случае использования на бульдозере совместно со спутниковой навигационной системой позволяет вычислить поворот отвала без использования потенциометрического датчика. Для уменьшения влияния искажения магнитного поля стальной конструкции машины после установки системы выполняется калибровка. Также измерения модуля используются для компенсации динамических возмущений. В случае бульдозера именно этот модуль позволяет обеспечить качественное управление отвалом на всех конструктивно допустимых скоростях движения. Дело в том, что бульдозер вследствие переднего расположения отвала как система управления потенциально неустойчив из-за возникновения сильной положительной обратной связи. Шасси машины проваливается в ошибочно сделанное отвалом углубление, что приводит к еще большей ошибке

позиционирования отвала. При движении на средних и высших скоростях без использования инерциального модуля машина теряет устойчивость, что выражается в волнообразно изменяющейся ошибке формируемого профиля. Таким образом, использование инерциального модуля позволяет улучшить профилирующие характеристики бульдозера, что, в свою очередь, позволяет для некоторых видов работ заменить грейдер бульдозером, обладающим более высокой производительностью и низкой стоимостью.



Рис. 3. Инерциальный измерительный модуль Topcon 3DMC2 sensor

Кроме углового положения рабочего органа необходимо знать превышения точек на его кромке над формируемой по проекту опорной поверхностью. Для последующей автоматической компенсации превышения система производит непрерывное определение значения превышения. Датчиками превышения могут быть: ультразвуковой датчик, датчик-приемник лазерного излучения, спутниковая антенна и оптическая призма. Условно систему на базе одного из первых двух датчиков в зависимости от комплектации принято называть одно-двухмерной (1D/2D), а на базе одного из двух последних – трехмерной (3D).

Ультразвуковой датчик используется для работы от опорных поверхностей, зафиксированных как конструктивный элемент строительного объекта, или относительно установленной по высоте строительной проволоки (струны). В корпус ультразвукового датчика помещен измерительный модуль на основе акустического трансдюсера, работающего по принципу акустической эхолокации на частоте 50 кГц, и преобразователя. Датчик позволяет измерить время прохождения акустического сигнала до отражающей поверхности и, учитывая скорость распространения этого сигнала, определить расстояние до этой опорной поверхности.

Датчик-приемник лазерного излучения используется для работы от искусственной опорной поверхности, формируемой в пространстве с помощью построителя лазерной плоскости. Внутри корпуса прибора с поликарбонатными вставками, пропускающими лазерное излучение, расположена вертикальная линейка фотоэлектрических датчиков. Датчик представляет собой полупроводниковый приемник, использующий в своей работе фотоэлектрический эффект, то есть эффект возникновения электродвижущей силы в результате попадания на фотоэлемент оптического излучения. По номеру фотоэлектрического датчика в линейке, принимающего оптическое излучение, встроенный микропроцессор определяет расстояние от среднего элемента до текущего положения опорной лазерной плоскости. При постоянном положении среднего элемента относительно

кромки рабочего органа значение смещения будет вводиться системой как поправка в превышение над опорной поверхностью.

При работе системы управления в режиме 3D в качестве датчика используется оптическая призма или спутниковая антенна. При работе с оптической призмой ее координаты определяются внешним независимым геодезическим прибором – автоматическим электронным тахеометром, а в случае использования спутниковой антенны ее положение определяется с помощью устанавливаемого на машину спутникового приемника, который может быть интегрирован в корпус контроллера. Оптические системы чувствительны к состоянию атмосферы (осадки, пыль) и требуют прямой видимости между машиной и прибором (построитель или тахеометр), в то время как спутниковые системы не зависят от этого. В настоящее время полностью развернуты две глобальные спутниковые навигационные системы: американская GPS и российская ГЛОНАСС. В системах управления техникой используется дифференциальный фазовый режим реального времени (RTK), обеспечивающий точность определения высотной компоненты на уровне 20...30 мм. Для достижения более высокой точности высотной компоненты можно использовать технологию Topcon mmGPS. В этом случае применяется дополнительный лазерный приемник (см. рис. 4), обеспечивающий точность вплоть до нескольких миллиметров. Также требуется установка специального построителя лазерной зоны, однако, в противоположность тахеометру, одного построителя достаточно для обслуживания неограниченного количества приемников в пределах стройплощадки.



Рис. 4. Лазерный приемник Topcon PZS-MC с установленной на нем GPS/ГЛОНАСС-антенной

Линии визирования между призмой и тахеометром, лазерным построителем и приемником, антенной и спутниками могут затеняться конструктивными элементами машины, другими машинами, конструкциями и людьми на строительной площадке. Во избежание этого все такие датчики располагаются на специальных высоких мачтах, устанавливаемых непосредственно на рабочем органе машины. Мачта представляет собой стальную трубу, закрепленную в корпусе из литого алюминия, с возможностью установки на рабочий орган с помощью посадочного отверстия и фиксирующего болта. Для демпфирования колебаний мачты, защиты датчиков и во избежание разрушения

конструкции из-за вибраций, возникающих при движении машины, мачта в корпусе крепится с помощью амортизирующих колец. Кроме мачты с фиксированной высотой установки для систем с лазерными приемниками существуют моторизованные мачты, в которых шаговый двигатель позволяет выдвинуть мачту на определенную высоту для попадания сигнала построителя в зону линейки фотоэлементов (обычно имеющих длину порядка 20 см). Это необходимо при большом разбросе исходных высот участка (больше длины линейки фотоэлементов) или во избежание необходимости переустановки построителя на другую высоту для нивелирования разноуровневых плоскостно-ломаных поверхностей. Поправка в превышение над опорной поверхностью вносится автоматически по известной высоте выдвижения.



Рис. 5. Контроллер Topcon MC-R3

Контроллер (рис. 5) выполнен на базе мощного микропроцессора, служащего для обработки данных, полученных с датчиков, а также дополнительных геодезических инструментов в случае их использования. После обработки данных определяются итоговые значения отклонений рабочего органа от проектных значений для приведения его в нужное положение. В цифроаналоговом преобразователе формируется электрический сигнал, пропорциональный цифровому выражению определенных ранее отклонений по двум основным параметрам - углу поперечного наклона рабочего органа и его превышению. Электрический сигнал передается с помощью кабельного соединения на электромагнитный гидрораспределитель, дополнительно устанавливаемый на машину. Основными параметрами сигнала являются: максимальный управляющий ток или напряжение и гистерезис, изменяемые в зависимости от используемых гидрораспределителей. Контроллер позволяет управлять двумя двухходовыми распределителями, например, по высоте и наклону отвала. В зависимости от комплектации системы контроллер может содержать внутри себя один или два спутниковых GPS/ГЛОНАСС-приемника для определения координат антенны, узкополосный приемник дифференциальных поправок с базовой станцией, как по выделенному радиоканалу, так и в сетях общего доступа (GSM, CDMA, 3G). В случае использования тахеометра в состав контроллера входит узкополосный приемник для приема измерений по выделенному радиоканалу.

Электромагнитный гидрораспределитель применяется для управления расходом и направлением движения гидравлической жидкости в гидравлических цилиндрах, отвечающих за движение рабочего органа машины. Модель гидрораспределителя подбирается в зависимости от модели машины, на которую производится установка системы управления, и находится в индивидуальном установочном комплекте. Распределитель - это комбинация двух основных функциональных узлов: электромагнита (соленоида) с подвижным сердечником и блока клапанов с проходным отверстием, в

котором установлен золотник, связанный с сердечником, чтобы открывать или перекрывать потоки. Клапана открываются или закрываются движением подпружиненного сердечника, который втягивается в соленоид, когда на его катушку подается питание.



Рис. 6. Дисплей Torcon GX-60

В качестве пользовательского интерфейса для настройки системы, используемых единиц измерений, хранения значений линейных промеров конструктивных элементов машины и рабочего органа, загрузки и отображения опорной поверхности, отображения превышения используется дисплей с кнопками (физическими или сенсорными). Также для переключения системы из ручного режима управления в автоматический и наоборот имеется переключатель, устанавливаемый на ручке управления отвалом. На рис. 6 изображен дисплей, имеющий цветной жидкокристаллический сенсорный экран, а также интерфейс USB для загрузки файлов опорной поверхности и конфигурации системы. Для дизайна опорных поверхностей используются различные системы автоматизированного проектирования (САПР) для персонального компьютера. Для съемки исходной поверхности и контроля качества поверхности «в натуре» используются как традиционные геодезические приборы, так и мобильные приемники GPS/ГЛОНАСС, устанавливаемые на вехе и управляемые портативным компьютером.