

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ В МОБИЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ АСФАЛЬТОВЫХ ДОРОГ

Д.А. Кацай, А.Н. Лысов, Д.В. Сергеев

Применение установки для поверхностной обработки придает асфальтовой дороге новое качество с точки зрения безопасности движения, а так же существенно продлевает её долговечность. В работу системы управления заложен принцип синхронного распределения материалов, сформулированный в работе [2], обобщающей опыт дорожников Франции по поверхностной обработке асфальтовых дорог.

1. Структура и принцип действия системы управления

На рисунке представлена структурная схема системы управления установкой, содержащая пульт управления оператора, вычислительное устройство, датчики и исполнительные устройства.

Основная задача, которая решается с помощью установки для поверхностной обработки асфальтовых дорог, состоит в дозировании материалов, регламентируемом в количественном выражении, в координатах относительно дороги и во временном диапазоне. В качестве материалов используют щебень фракции 5-20 мм и вяжущий материал в виде битума, нагретого до температуры 160 °С, или битумной эмульсии, нагретой до температуры 60 °С.

Корректировка расхода связующего материала, в зависимости от текущего значения скорости движения установки, осуществляется в прототипе с помощью аксиального насоса, который, в свою очередь, приводит в движение гидромотор, подающий связующий материал в форсунки. Наличие в системе двух контуров управления на гидравлических линиях приводит к большому постоянному времени в 1-1,5 с, что приводит к затягиванию переходного процесса в системе до 3-4,5 с. За это время установка может проехать от 3 до 13 м и оставить за собой некачественный участок дороги.

Указанные недостатки были устранены путем введения в сливную гидролинию дополнительного исполнительного устройства управления с астатическими свойствами относительно ошибки по давлению связующего материала, подаваемого через форсунки на поверхность асфальтовой дороги. Система управления защищена патентом РФ на полезную модель [3]. Предлагаемая система управления позволяет уменьшить на порядок значение постоянной времени и свести неравномерность наносимого покрытия до приемлемой величины.

2. Математическая модель объекта

В число переменных вектора состояния $x(t)$ включены: давление связующего материала в рампе – $x_1(t)$, давление масла в магистрали управления битумным насосом – $x_2(t)$, напряжение управления ДВС – $x_3(t)$, интеграл по ошибке давления в рампе относительно его расчетного значения – $x_4(t)$.

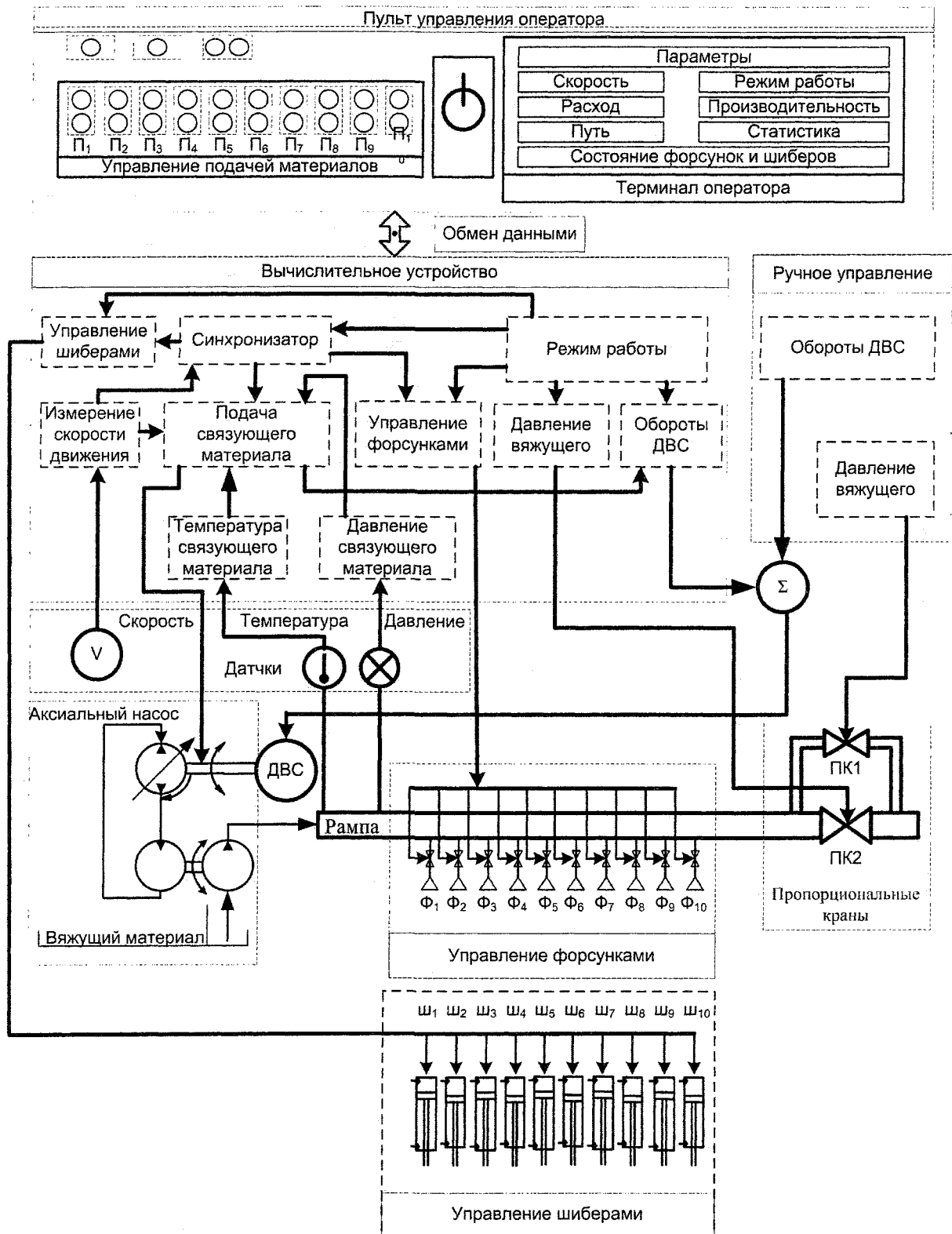
Ненулевые элементы матрицы состояния $A(t)$ записаны на основании экспериментальных данных и структуры объекта: $a_{1,1} = -1/T_1$; $a_{1,2} = x_{1n}/(x_{2n}T_1)$; $a_{2,2} = -1/T_2$; $a_{2,3} = x_{2n}/(x_{3n}T_2)$; $a_{3,1} = x_{3n}/(x_{1n}T_3)$; $a_{3,3} = -1/T_3$; $a_{3,4} = x_{3n}/(x_{4n}T_3)$; $a_{4,1} = x_{4n}/(x_{1n}T_4)$; $a_{4,4} = -1/T_4$, где T_1 – постоянная времени битумного насоса; T_2 – постоянная времени двигателя; T_3 – постоянная времени ДВС; T_4 – постоянная времени интегратора; x_{1n} – номинальное давление связующего материала в рампе; x_{2n} – номинальное давление масла в магистрали управления битумным насосом; x_{3n} – номинальное значение управляющего напряжения; x_{4n} – номинальное значение переменной состояния, уравнивающей номинальные значения других переменных.

Коэффициенту $a_{1,2}$ соответствует связь между выходом битумного насоса и рампой в виде напорной гидролинии. Коэффициенту $a_{2,3}$ соответствует прямая механическая связь между выходным валом ДВС и входным валом битумного насоса. Коэффициенту $a_{3,1}$ соответствует связь между давлением в рампе и управляющим напряжением. Коэффициенту $a_{3,4}$ соответствует связь между управляющим напряжением и интегралом от ошибки давления в рампе. Коэффициенту $a_{4,1}$ соответствует связь между интегралом от ошибки давления в рампе и давлением в рампе.

Ненулевые элементы матрицы управления B имеют следующий вид: $b_{1,2} = 1$; $b_{3,1} = 1$.

Управление $u(t)$ является векторной величиной, имеющей в качестве независимых компонент напряжения управления ДВС и пропорционального клапана в сливной гидролинии. Управление $u(t)$ можно представить в виде линейной комбинации переменных состояния: $u(t) = P \times x(t)$, где P – регулятор по состоянию; p_{ij} , ($i = 1, 2$; $j = 1 \dots 4$) – неизвестные коэффициенты регулятора.

Реализация закона управления возможна в случае полной измеряемости вектора состояния или в случае полной наблюдаемости системы. Прямому измерению доступно значение первой компоненты вектора состояния $x_1(t)$, которая представляет собой давление связующего материала. Еще одна переменная $x_4(t)$ является внутренней переменной, ее



Структурная схема системы управления

значение формируется в вычислительном устройстве алгоритмически. В этой связи ненулевые элементы матрица наблюдения C принимают вид: $c_{1i} = 1$.

Проверка ранга матрицы наблюдаемости по Калману дает значение ранга равное 4, совпадающим с порядком системы. Следовательно, по

имеющемуся вектору наблюдения можно восстановить весь вектор состояния системы управления.

Получение желаемых показателей динамического качества и устойчивости системы управления возможно, если система является полностью управляемой по Калману. Проверка ранга матрицы

управляемости дает значение ранга равное 4, совпадающее с порядком системы. Следовательно, система является полностью управляемой по Калману.

Проведенные оценки управляемости и наблюдаемости подтверждают принципиальную возможность построения системы управления с желаемыми динамическими характеристиками.

3. Модальный синтез астатической системы управления

Рассматриваемая система имеет четвертый порядок, поэтому её динамические свойства можно задать с помощью четырех желаемых комплексно-сопряженных корней. Характеристическое уравнение с желаемыми корнями $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$:

$$(\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2)(\lambda - \lambda_3)(\lambda - \lambda_4) = 0.$$

Этому уравнению можно поставить в соответствие вектор коэффициентов $v_{\lambda G}(\lambda_G)$, компоненты которого являются функциями желаемых корней.

Для настройки коэффициентов регулятора p_{ij} , ($i = 1, 2; j = 1 \dots 4$) необходимо составить характеристическое уравнение системы управления с замкнутым контуром обратной связи:

$$|\lambda E - (A - B \times P)| = 0,$$

где E – единичная матрица четвертого порядка.

После подстановки параметров матриц E, A, B и P получается вектор коэффициентов $v_{\lambda P}(P)$ характеристического уравнения с неизвестными коэффициентами матрицы регулятора P , которые получить из решения системы алгебраических уравнений:

$$v_{\lambda P}(P) = v_{\lambda G}(\lambda_G).$$

4. Модель системы управления с фильтром Калмана

На основе линейной модели системы управления строится расширенная модель, включающая в себя фильтр Калмана, как динамическую систему.

Уравнения состояния расширенной системы в векторно-матричной форме [1]:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A \times \hat{x} + B \times (u + f + v); \\ y = C \times \hat{x}; \\ \dot{\hat{x}} = (A - K \times C) \times \hat{x} + K \times y + B \times u; \\ u = -P \times \hat{x}, \end{cases}$$

где \hat{x} – вектор состояния фильтра Калмана; v – вектор случайного возмущения; w – вектор измерительного шума; f – задающее воздействие.

Векторы случайного возмущения v и измерительного шума w в данной модели представляют собой случайные процессы с нормальным законом распределения и имеют следующие дисперсии:

$Dv = (0,5Pn)^2$ – дисперсия входного возмущения, $Dw = (0,1Pn)^2$ – дисперсия измерительного шума, где Pn – номинальное давление в рампе. Данные соотношения были получены на основании дорожных испытаний опытной установки.

Коэффициенты фильтра Калмана K находятся с помощью матричного уравнения Рикатти.

Для формирования ошибки по давлению в рампе сформировано задающее воздействие в виде функции от требуемого расхода вяжущего материала и скорости движения установки по экспериментальным данным. Наилучшее приближение по минимуму среднеквадратической ошибки экспериментальных значений дает следующая функция скорости требуемого движения установки от двух переменных:

$$V(p, q) = a_0 + a_1 q + a_2 p + b/q^2,$$

где p – давление связующего материала в рампе; q – требуемый расход связующего на единицу площади поверхности дороги; $a_0 = -45,9$; $a_1 = -29,7$; $a_2 = 66,4$; $b = 9,2$ – постоянные коэффициенты.

Эффективность работы фильтра оценивается через коэффициент вариации, который определяется как отношение величины среднего квадратического отклонения (СКО) к математическому ожиданию.

Выводы

Для процесса регулирования давления относительно номинального значения, равного 3 Бар, без фильтра Калмана, величина СКО составляет 0,2 Бар, следовательно, коэффициент вариации равен 6,7 %. Для случая регулировки давления с фильтром Калмана, величина СКО составляет 0,09 Бар, следовательно, коэффициент вариации равен 3 %. Отношение коэффициентов вариации дает значение 2,2 в пользу фильтра Калмана.

Литература

1. Буков, В. Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем / В. Н. Буков. - Калуга: Издательство научной литературы Н. Ф. Бочкаревой, 2006. - 720 с.
2. Васильев, А. П. Поверхностная обработка с синхронным распределением материалов I А. П. Васильев, П. Шамбар. - М.: Трансдорнаука, 1999. - 80 с.
3. Пат. 60236 РФ, МПК⁷ G05D 7/00, E01C 23/03. Система управления битумощебнераспределителя / Д. А. Кацай, Д. В. Сергеев. - №2006113805/22 ; заявлено 25.04.2006 ; опубл. 10.01.2007.