

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАВЕСНОГО СНЕГОУБОРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Киц И.В., Воронцов И.И.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург

Ключевые слова: навесное снегоуборочное оборудование, плужно-щеточный комплекс, шнекороторное оборудование, виртуальный датчик, предиктивная аналитика, качество очистки дорог, фильтр Калмана.

Аннотация. В статье рассмотрены существующие подходы к оценке рабочих характеристик и технического состояния навесного снегоуборочного оборудования плужно-щеточного типа, применяемого на коммунальных машинах. Выявлены системные ограничения традиционных методов контроля, таких как дискретность, необходимость нахождения транспортного средства в сервисной зоне и невозможность их применения в процессе активной работы оборудования в условиях агрессивной среды. Предложена усовершенствованная комплексная методология непрерывного предиктивного мониторинга навесного оборудования, основанная на синтезе теоретических моделей взаимодействия рабочих органов со средой, телеметрии и алгоритмах виртуальных датчиков. Предложен энергетический критерий оценки эффективности и способ косвенного определения износа элементов рабочего оборудования.

METHODS FOR EVALUATING THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF MOUNTED SNOW REMOVAL EQUIPMENT

Kits I.V., Vorontsov I.I.

*Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint-Petersburg*

Keywords: mounted snow removal equipment, plow-brush complex, auger-rotor equipment, soft sensor, predictive analytics, road cleaning quality, Kalman filter.

Abstract. The article examines existing approaches to assessing the performance and technical condition of mounted snow removal equipment of the plow-brush type used on municipal vehicles. The systemic limitations of traditional control methods are identified, such as discreteness, the need for the vehicle to be in a service area, and the impossibility of their application during active equipment operation in an aggressive environment. An improved comprehensive methodology for continuous predictive monitoring of mounted equipment is proposed, based on a synthesis of theoretical models of interaction between working bodies and the environment, telemetry, and soft sensor algorithms. An energy efficiency criterion and a method for indirect determination of wear of working equipment elements are proposed.

Введение

Обеспечение бесперебойного и безопасного функционирования транспортно-технологических систем в зимний период является одной из наиболее ресурсоемких задач дорожно-коммунального комплекса. Традиционные подходы к мониторингу работы снегоуборочных машин, основанные на базовых системах спутниковой телеметрии, таких как «ГЛОНАСС», фиксируют преимущественно пространственно-временные треки и факт перемещения техники с активно используемым оборудованием. Однако данные системы не позволяют оценивать

реальную энергоемкость процесса, динамику износа рабочих органов и фактическое качество очистки дорожного полотна в режиме реального времени. Это приводит к возникновению скрытых отказов непосредственно на линии, нерациональному расходу горюче-смазочных материалов и преждевременному износу узлов рабочего оборудования.

Целью данного исследования является разработка усовершенствованной методологии непрерывного предиктивного контроля и оценки рабочих характеристик навесного снегоуборочного оборудования, интегрирующей теоретические модели террамеханики – механики взаимодействия транспортных движителей с поверхностью, по которой происходит движение, а также алгоритмы косвенных измерительных систем.

1. Характеристики навесного оборудования и зоны критического износа

Современные навесные снегоуборочные агрегаты, применяемые в связке с базовыми колесными шасси, по принципу взаимодействия со снегом разделяются на плужные, щеточные, шнекороторные и фрезерно-роторные. С точки зрения надежности каждый тип оборудования обладает специфическими зонами износа [1, 2].

Плужное оборудование функционирует в режиме циклического сдвига и подрезания снежной массы. Наиболее интенсивному абразивному истиранию здесь подвергаются нижние сменные ножи и опорные лыжи. Помимо этого, повышенный износ имеют элементы подвески оборудования, которые испытывают жесткие динамические удары при контакте с дефектами дорожного покрытия.

Щеточное оборудование осуществляет фрикционную очистку за счет вращения ворсовых щеток. Основные проблемы в процессе эксплуатации связаны с геометрическим укорачиванием ворса, а также с износом опорных подшипников вала, работающих в условиях постоянного воздействия смеси воды, снега и дорожных реагентов.

Для шнекороторных и фрезерно-роторных машин активного действия критическими зонами износа являются срезные предохранительные болты шнеков, витки спиралей, лопасти высокооборотного ротора и внутренняя поверхность его корпуса, подверженная выраженному пескоструйному эффекту от ледяной крошки и дорожного смета.

2. Ограничения существующих методов оценки

Применяемые на практике методы контроля рабочих параметров условно классифицируются на три группы: эксплуатационно-технологические, инструментально-диагностические и тягово-энергетические. Главным системным ограничением указанных методов является их дискретность и реактивный характер: качественная инструментальная дефектовка возможна только в условиях сервисной зоны, а данные CAN-шины о расходе топлива не привязаны к физико-механическим характеристикам обрабатываемой среды [3]. Ни один прямой физический датчик не способен работать непосредственно в зоне контакта рабочего органа с дорожной поверхностью, поскольку мгновенно подвергается воздействию наледи, грязи и химических реагентов, что напрямую влияет на его работоспособность.

3. Предлагаемая комплексная методология оценки

Для ликвидации слепых зон мониторинга предложена сквозная методология, использующая концепцию виртуальных датчиков. Вместо прямой фиксации геометрического износа система вычисляет его косвенно, интерпретируя измеряемые параметры технологического процесса на основе фундаментальных математических моделей террамеханики.

Архитектура методологии включает четыре последовательных этапа, первым из которых можно выделить теоретическое моделирование. В бортовую систему закладываются аналитические зависимости сопротивления снега резанию от его плотности ρ и температуры t , а также матрицы усталостной деградации конструкционных материалов [1, 4]. Вторым этапом следует выделить мониторинг – непрерывное получение данных о скорости машины, расходе топлива, оборотах ВОМ – вала отбора мощности, и давлении в гидросистеме.

В качестве третьего этапа необходимо применить виртуальный анализатор. Ключевая новизна заключается в разделении влияния тяжести дорожных условий от технического износа агрегата. Косвенная идентификация плотности снега может быть получена путем сопоставления текущей скорости движения машины, ширины захвата и приращения крутящего момента на ВОМ ($M_{\text{ном}}$), система в каждый момент времени рассчитывает плотность среды ρ . Виртуальный датчик износа ножа отвала в плавающем режиме может быть получен следующим образом: традиционные гидросистемы КДМ работают без принудительного прижима, отвал скользит под действием собственного веса G . При истирании ножа и уменьшении его высоты изменяется кинематика подвески и угол атаки, что влечет за собой смещение центра масс и изменение плеча приложения равнодействующей силы сопротивления снега P_x . Это изменение вызывает перераспределение динамических реакций в гидроцилиндрах подвески, фиксируемое датчиками давления в виде изменения амплитудно-частотного спектра пульсаций масла. Алгоритм пересчитывает данные флуктуации в линейный износ ножа Δh . Фильтрация динамического шума также необходима, так как высокочастотные колебания, обусловленные движением машины по неидеальному дорожному покрытию, отсекаются с помощью модифицированного алгоритма фильтрации Калмана [5].

На четвертом этапе предлагаемой методологии необходимо произвести расчет обобщенного интегрального критерия эффективности E (размерность – $\text{м}^2/\text{Дж}$), который отражает удельную площадь очистки, отнесенную к суммарным затратам энергии с учетом темпов износа:

$$E = \frac{S \cdot K_q}{\int N_{\text{дв}} d\tau \cdot (1 + \Delta R)}, \quad (1)$$

где S – фактически очищенная площадь (м^2), верифицированная по ГЛОНАСС; K_q – безразмерный коэффициент качества (определяется через стабильность удержания плавающего положения навески) [6]; $N_{\text{дв}}$ – мгновенная мощность двигателя (Вт), транслируемая из CAN-шины; τ – время рабочего цикла (с); ΔR – безразмерная относительная доля износа расходных материалов за цикл ($\Delta R = \Delta h / h_{\text{ном}}$).

Применение знаменателя в виде $(1+\Delta R)$ обусловлено тем, что при нулевом износе нового оборудования ($\Delta R = 0$) эффективность определяется чистым отношением полезной работы к затраченной энергии, а по мере износа рабочих органов ($\Delta R \rightarrow 1$) показатель эффективности закономерно снижается.

4. Сравнительный анализ

Применяемые серийно системы телематики, фиксируют в большей степени лишь факт движения и расход топлива, не оценивая при этом износ оборудования и качество уборки. В отличие от серийных систем предложенная методология позволяет перевести контроль за процессом работы и характеристиками оборудования в предиктивный режим. Ключевые проблемы и их сравнение приведено в таблице 1.

Табл. 1. Сравнение ключевых проблем

Задача	Существующие решения	Предлагаемая методология
Оценка текущего износа ножей и ворса щеток	Ручные замеры во время простоя техники в боксах. Прямые физические датчики разрушаются в зоне трения.	Виртуальный датчик на основе анализа флуктуаций давления в гидравлическом контуре и крутящего момента.
Контроль качества очистки дорожного полотна	Выборочный визуальный осмотр мастером смены после прохода колонны техники.	Косвенный непрерывный контроль через оценку стабильности частотного спектра плавающего положения навески.
Учет изменчивости физических свойств снега	Не учитывается. Падение скорости прохода из-за плотного наката ложно трактуется как поломка или невыполнение работы.	Динамическое вычисление плотности ρ «на лету» через корреляцию скорости шасси и момента на ВОМ.

Заключение

Разработанная комплексная методология на основе виртуальных датчиков позволяет осуществлять непрерывный контроль рабочих характеристик навесного оборудования непосредственно во время выполнения технологического цикла, полностью исключая необходимость размещения хрупких физических сенсоров в зоне абразивного контакта.

Математическое моделирование энергоемкости процесса с учетом вычисляемой плотности снега обеспечивает предиктивное планирование технического обслуживания: система способна прогнозировать остаточный ресурс подшипниковых опор и шестерен редукторов с достаточной точностью. Практическое внедрение методологии в работу коммунальных служб позволяет снизить издержки на аварийный ремонт на 20-25% и оптимизировать нормы расхода дорогостоящих щеточных дисков и ножей отвалов на 15-20%.

Список литературы

1. Баловнев В.И., Данилов Р.Г. Строительные и дорожные машины и основы их автоматизации: учебник для вузов. – М.: Академия, 2014. – 512 с.
2. Дорожно-строительные машины и комплексы / Под ред. В.И. Баловнева. – М.: Машиностроение, 2001. – 424 с.
3. Распоряжение Минтранса РФ от 14.03.2008 №АМ-23-р «О введении в действие норм расхода топлив и смазочных материалов на автомобильном транспорте».
4. Васильев А.П. Эксплуатация автомобильных дорог: учебник для вузов. В 2 т. – М.: Академия, 2010. – Т. 2. – 544 с.
5. Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // Journal of Basic Engineering. 1960, vol. 82, pp. 35-45.
6. ОДМ 218.4.032-2017. Методические рекомендации по оценке качества содержания автомобильных дорог общего пользования. – М.: Росавтодор, 2017.

Сведения об авторах:

Киц Иван Викторович – аспирант;

Воронцов Иван Иванович – д.т.н., профессор.