

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 621.878

ОБОСНОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ АДАПТАЦИИ ЗЕМЛЕРОЙНО-ТРАНСПОРТНОЙ МАШИНЫ К УСЛОВИЯМ ВНЕШНЕГО НАГРУЖЕНИЯ

В.А. Шевченко, доц., к.т.н.,

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. В процессе эксплуатации землеройные машины испытывают сложное силовое воздействие со стороны обрабатываемой среды. В процессе всего жизненного цикла машины условия ее нагружения могут многократно изменяться. Для обеспечения высокого уровня показателей качества машина должна быть оборудована системами, позволяющими адаптироваться к режимам внешнего нагружения.

Ключевые слова: землеройно-транспортная машина, адаптация, пространство динамических состояний, режим нагружения.

ОБҐРУНТУВАННЯ КОНЦЕПЦІЇ АДАПТАЦІЇ ЗЕМЛЕРИЙНО-ТРАНСПОРТНИХ МАШИН ДО УМОВ ЗОВНІШНЬОГО НАВАНТАЖЕННЯ

В.О. Шевченко, доц., к.т.н.,

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У процесі експлуатації землерійні машини зазнають складного силового впливу з боку середовища, що обробляється. У процесі всього життєвого циклу машини умови її навантаження можуть багаторазово змінюватися. Для забезпечення високого рівня показників якості машина повинна бути обладнана системами, що дозволяють адаптуватися до режимів зовнішнього навантаження.

Ключові слова: землерійно-транспортна машина, адаптація, простір динамічних станів, режим навантаження.

SUBSTANTIATION OF THE CONCEPT OF EARTH-MOVING MACHINES ADAPTATION TO EXTERNAL LOADING CONDITIONS

V. Shevchenko, Assoc. Prof., Cand. Sc. (Eng.),
Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. In the process of earth-moving machines operation a complex power impact caused by the environment under treatment is experienced. During the machine life-cycle its loading conditions can change many times. To achieve a high level of quality parameters the machine should be equipped with the systems enabling adaptation to external loading conditions.

Key words: earth-moving machine, adaptation, space of dynamic states, loading mode.

Введение

Одним из наиболее распространенных типов машин в строительном производстве являются землеройно-транспортные машины (ЗТМ).

К их числу относятся бульдозеры, скреперы, автогрейдеры, грейдер-элеваторы, одноковшовые фронтальные погрузчики и т.д. Принципиальное отличие данного типа машин от всех остальных заключается в том, что при

разработке рабочей среды этими машинами тяговое (движущее) усилие развивается в зоне контакта ходового оборудования с опорной поверхностью, а силы сопротивления со стороны обрабатываемого материала воздействуют на рабочее оборудование машины. Подобное распределение нагрузок приводит к сложным режимам нагружения практически всех узлов и систем ЗТМ. Традиционно серийно выпускаемые машины проектируются по нормативным методикам, не всегда соответствующим конкретным условиям их эксплуатации. В реальных же ситуациях на машину может действовать намного более широкий спектр внешних нагрузок. Например, изменение вида выполняемой рабочей операции может привести к изменению условий нагружения и, в конечном счете, к снижению показателей надежности ЗТМ. Как следствие, это вызывает падение производительности. Существует по крайней мере два выхода из создавшейся ситуации. Первый – проектирование машин непосредственно под заданные условия эксплуатации в данной конкретной организации. Данный подход порождает множество конкурирующих методик проектирования и, одновременно, лишает машины универсальности. Второй вариант решения проблемы – разработка ЗТМ, способных самостоятельно адаптироваться (приспосабливаться) к переменным условиям внешнего нагружения. С нашей точки зрения, данный подход является более перспективным и требует проведения дополнительных исследований.

Анализ публикаций

Наибольшее развитие идеи адаптации получили в задачах управления открытыми динамическими системами. В рамках общей постановки задачи адаптивного управления динамическими системами предполагается составление уравнений движения механической системы в векторно-матричном виде [1]

$$A(q, \tau)\ddot{q} + B(q, \dot{q}, \tau) = u(t) + v(t), \quad (1)$$

где $A(q, \tau)$ – матрица кинетической энергии; $B(q, \dot{q}, \tau)$ – квадратичная векторная форма обобщенных скоростей; q – вектор обобщенных координат системы; τ – вектор неизвестных (неконтролируемых) параметров системы; $u(t)$ – вектор управлений, опреде-

ляющий вектор обобщенных управляющих сил; $v(t)$ – помехи, представляемые в виде равномерно ограниченной кусочно-непрерывной вектор-функции времени.

Решение проблемы адаптации опирается на определение целевых условий управления и реализацию алгоритмов адаптивного управления. В подавляющем большинстве при составлении математических моделей рассматриваются детерминированные подходы.

Применительно к системам управления обычно рассматривают одну из двух типов задач адаптивной стабилизации механической системы относительно требуемого закона движения $q_p(t)$ [1]:

1. Пассивная стабилизация. Предполагает выполнение неравенства

$$\|q(t) - q_p(t)\|^2 + \|\dot{q}(t) - \dot{q}_p(t)\|^2 < \delta, \quad (2)$$

где t – время, $\delta > 0$ – заданная точность отслеживаемого движения системы.

2. Оптимальная стабилизация. В этом случае требуется выполнение условий (2) при одновременной минимизации функционала качества системы управления

$$I(x, u, \tau, \bar{\tau}, t) \rightarrow \min_{u(x, \bar{\tau}) \in U}. \quad (3)$$

Представленный функционал может характеризовать возможные энергетические, мощностные, временные и другие затраты [1]. Чаще всего в теории управления механическими системами исследуются адаптивные задачи с интегральным квадратичным функционалом Ляпунова [1]

$$\begin{aligned} I(x, u, \bar{\tau}, t_1) &= V[x(t_1), \tau(t_1)] + \\ &+ \int_{t_0}^{t_1} \{V[x(t), \tau(t)] + W[u(t), \bar{\tau}(t)]\} dt \rightarrow (4) \\ &\rightarrow \min_{u(x, \bar{\tau}) \in U}, t_0 \leq t \leq t_1. \end{aligned}$$

В работе [2] авторы обращают внимание на тот факт, что подавляющее число динамических систем являются существенно нелинейными. При этом воздействие среды на исследуемый объект чаще всего неконтролируемо и неопределенно.

На основе анализа поведения нелинейных динамических систем авторы предлагают по-новому трактовать проблему синтеза адаптивной системы управления [2]. В качестве целей управления предлагается использовать достижение желаемых динамических состояний, что исключает проведение анализа в соответствии с известными условиями устойчивости по Ляпунову. При этом для решения задач адаптивного управления в системах с неравновесной и неустойчивой целевой динамикой широкого класса нелинейных динамических систем необходимо описание нелинейных динамических систем на языке, не требующем точного знания дифференциальных уравнений самого объекта, а также математический аппарат анализа соединений таких объектов [2]. Принципы и ограничения в задаче синтеза адаптивного регулятора вытекают из анализа функциональных пространств состояния объекта. Для разработки математических моделей объектов и описания целевых функций управления в условиях нелинейности и неопределенности, по мнению авторов, необходимо применять аппарат нечеткой математики. Данный подход к проблеме синтеза адаптивных систем управления является новым и требует проведения дополнительных исследований.

Примером реализации новых подходов к адаптивному управлению рабочими процессами ЗТМ могут служить работы В.А. Мещерякова [3, 4]. Автор справедливо утверждает, что для разработки систем адаптивного управления ЗТМ необходимо опираться на информацию о динамике рабочих процессов ЗТМ. Для этого необходимо развивать два подхода. Первый основан на разработке аналитических моделей элементов рабочих процессов и их объединении в общую имитационную модель. Такой подход базируется на априорной информации о конструкции ЗТМ. Второй подход к моделированию рабочих процессов ЗТМ основан на идентификации рабочих процессов, что позволяет создавать адаптивные динамические модели на основе экспериментальных данных, характеризующих параметры таких процессов. Указанный подход дает возможность находить и моделировать скрытые зависимости между параметрами рабочих процессов, не имея полной информации об устройстве ЗТМ и характеристиках среды [4]. Автор отдает предпочтение второму подходу и предлагает моделировать рабочие

процессы ЗТМ с помощью самообучающейся нейросетевой динамической модели [3].

Идеи, предложенные В.А. Мещеряковым, предполагают прежде всего наличие реальной машины и проведение на ней комплекса экспериментальных исследований, позволяющих «обучить» разработанную нейросетевую динамическую модель. В представленных примерах, реализующих разработки автора, цели управления упрощены и утилитарны. Так, при анализе процесса перемещения грунта автогрейдером в качестве цели управления предлагается критерий поддержания максимальной тяговой мощности [5]. При профилировании и планировании поверхности земляного полотна в качестве целевого критерия управления выступает минимизация отклонений вертикальных координат рабочего органа от проектных отметок. Для реализации управляющего воздействия чаще всего используется гидравлический привод управления рабочим органом и регулирование скорости движения ЗТМ.

Подобный подход не учитывает того факта, что для существенно нелинейных динамических систем, каковыми являются ЗТМ, характерным при плавном изменении параметров является проявление бифуркационных явлений, а также процессов динамического хаоса, порождаемых самой машиной. Рассмотренные адаптивные принципы управления в большинстве перечисленных ситуаций способны только частично обеспечить заданный уровень комплексных качественных показателей, характеризующих эксплуатационные свойства ЗТМ.

Цель и постановка задачи

Целью предлагаемого исследования является разработка концепции адаптации ЗТМ к переменным условиям внешнего нагружения.

Факторы, вызывающие изменение условий нагружения ЗТМ

Для разработки стратегии адаптации ЗТМ к условиям внешнего нагружения необходимо выявить факторы, которые приводят к изменению характеристик действующих внешних нагрузок. Анализ условий эксплуатации землеройной техники показывает, что таких факторов несколько. Наиболее важными являются физико-механические параметры об-

рабатываемой среды, случайное воздействие на работу машины со стороны оператора, а также параметры как самой ЗТМ, так и рабочего процесса, выполняемого ею. Последние определяются целым рядом особенностей и аспектов (табл. 1).

Физические и механические характеристики разрабатываемой среды, а также геометрические характеристики рабочего органа ЗТМ, оказывают существенное влияние на формирование сил сопротивления, возникающих в процессе разработки материалов. Этот факт

подтверждается большим количеством соответствующих теорий копания и разрушения грунтов и строительных материалов.

Геометрические, кинематические и динамические характеристики самой машины определяют формирование режима нагружения отдельных узлов ЗТМ и решающим образом влияют на амплитудные и частотные характеристики нагружения, действующего в переходных процессах. Этот факт подтверждается многочисленными исследованиями динамических моделей движения ЗТМ.

Таблица 1 Факторы, влияющие на параметры нагружения ЗТМ

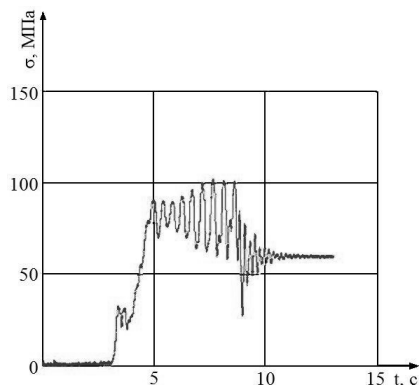
Фактор	Параметры, характеризующие влияние фактора на нагрузку
Физические и механические характеристики разрабатываемой среды	Плотность, влажность, коэффициент внутреннего трения, коэффициент внешнего трения, коэффициент разрыхления, напряжение сжатия, напряжение сдвига, коэффициент сцепления, удельный коэффициент сопротивления резанию, удельный коэффициент сопротивления копанию и т.д.
Параметры ЗТМ	Геометрические характеристики основного рабочего органа: ширина, высота, угол резания, угол захвата, угол перекоса, тип рабочего органа. Геометрические характеристики машины: габаритные размеры, база колеи, положение центра тяжести, геометрические параметры подвески рабочего органа и т.д. Кинематические характеристики: начальная скорость движения машины, скорость перемещения штоков управляющих гидроцилиндров и т.д. Динамические характеристики: масса и моменты инерции машины и отдельных ее узлов; коэффициенты упругости и демпфирования ходового оборудования, рабочего оборудования, несущей металлоконструкции, привода управления; характеристики связей и т.д.
Вид выполняемой операции	Копание, планирование, профилирование, перемешивание материалов, перемещение материалов и т.д.
Этап рабочего цикла	Заглубление рабочего органа в разрабатываемую среду, копание разрабатываемого материала, транспортировка материала, холостой ход (транспортный режим движения)
Способ выполнения рабочей операции	Последовательность и продолжительность включения исполнительных механизмов
Оператор	Случайные управляющие воздействия на протекание рабочего процесса
Вид сменного рабочего оборудования	Геометрические параметры; физический процесс, реализуемый при разработке материала

Являясь существенно нелинейной динамической системой, состоящей из ряда основных узлов (двигателя, трансмиссии, ходового оборудования, металлической конструкции, рабочего оборудования и системы управления), каждый из которых имеет свои динамические характеристики и связи между которыми могут иметь сложный вид, в реальной эксплуатации машина способна самостоятельно, без вмешательства оператора, варьировать режимы нагружения каждого из узлов [6, 7]. В процессе проведения экспериментов на автогрейдер среднего типа при выполнении операций, сопровождавшихся

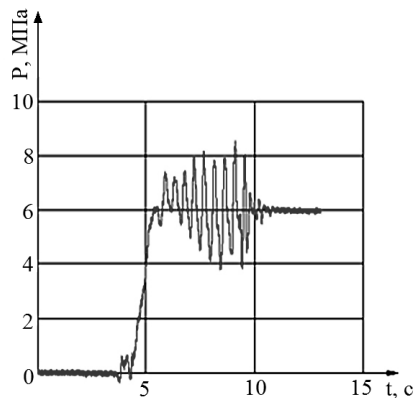
блокированием основного рабочего органа (заглубление отвала в грунт на скорости до полной остановки машины), отмечено появление и развитие в отдельных системах машины неконтролируемых колебательных процессов (рис. 1).

Важным, на наш взгляд, является то, что колебания развивались в системах машины не одновременно. Так, в ряде экспериментов отмечено развитие колебательных процессов в металлической конструкции и гидроприводе управления отвалом, а трансмиссия при этом работала в штатном режиме и наоборот.

Увеличение скорости выполнения рабочих операций существенно увеличивает вероятность появления и развития неуправляемых спонтанных колебаний в отдельных узлах. При начальной скорости машины до 0,8 м/с в режимах движения, близких к стопорению рабочего органа, колебательные процессы автоколебательного типа в системах автогрейдера не регистрировались вообще. Если рабочие скорости равны 1,2 м/с и выше, вероятность появления и развития таких процессов возрастает до 100 %. Современные методики проектирования ЗТМ не предполагают исследование подобного рода режимов нагружения и чаще всего не рассматривают конструктивные мероприятия, позволяющие их избежать.



а



б

Рис. 1. Осциллограммы изменения во времени главных напряжений в хребтовой балке (а) и давления гидравлической жидкости в гидроцилиндрах подъема-опускания основного отвала (б)

С целью повышения эффективности использования ЗТМ их применяют для выполнения различных технологических операций. При этом каждая из операций сопровождается своими условиями нагружения. Например, при выполнении операций резания и транс-

портирования грунта и материалов внешние нагрузки надежно описываются как случайный процесс [8]. Вместе с этим, при реализации технологических операций, сопряженных с неустановившимся движением как самой машины, так и ее рабочего оборудования, режим нагружения достаточно точно может быть описан как детерминированный динамический процесс [9]. Существенное влияние на режим нагружения оказывают скоростные характеристики выполняемого технологического процесса. Часть авторов обращают внимание на то, что с увеличением начальной скорости движения машины сопротивление копанью также увеличивается. Однако тот факт, что при этом изменяются амплитудные и частотные характеристики внешней нагрузки, исследован недостаточно [10, 11].

Немаловажным фактом, определяющим условия нагружения ЗТМ, является способ выполнения одной и той же технологической операции. Так, например, черпание сыпучего материала одноковшовым фронтальным погрузчиком может выполняться различными техническими приемами:

- движением рабочего органа в горизонтальном направлении за счет реализации предельного тягового усилия и инерции массы машины;
- движением машины в горизонтальном направлении с одновременным поворотом стрелы;
- заглублением рабочего оборудования в штабель материала с одновременным поворотом ковша;
- совмещением нескольких перечисленных приемов.

Каждый из способов формирует свои особенности нагружения ЗТМ.

Еще одним фактором, влияющим на формирование условий нагружения, является изменение направления главного вектора внешней нагрузки. На различных этапах рабочего цикла машина воспринимает различные типы нагружения. Так, при копании грунта преобладающими являются силы рабочего сопротивления на рабочем органе (в основном учитываются горизонтальные нагрузки). В транспортном же режиме доминируют вертикальные весовые и инерционные нагрузки. Проведенные эксперименты показали, что в транспортных режимах движения напряжения, действующие в основной металлической

конструкции ЗТМ, соизмеримы с напряжениями, возникающими в режимах копания, а иногда и превышают их на 30–80 % в зависимости от рельефа опорной поверхности и скорости движения машины [12].

Значительное влияние на условия внешнего нагружения оказывает тип рабочего оборудования, установленного на ЗТМ. Учитывая тот факт, что одним из перспективных направлений развития ЗТМ является широкое использование различных сменных рабочих органов, следует ожидать вариации действующих нагрузок в широком диапазоне. Так, для автогрейдеров рекомендуется использовать не менее 30 сменных рабочих органов, для одноковшовых фронтальных погрузчиков – более 100. Машина, спроектированная для выполнения типовых рабочих операций основным рабочим оборудованием, в реальных условиях при замене рабочего органа автоматически будет испытывать новый, не учтенный ранее, режим нагружения.

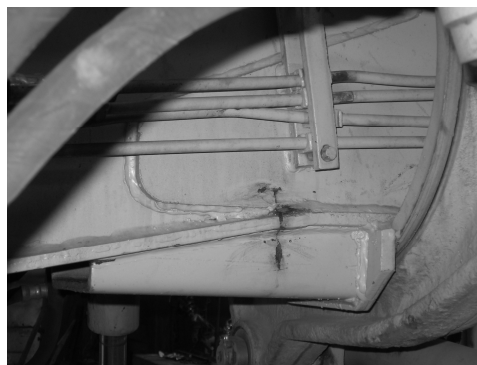
Чаще всего выполнение рабочих операций не основным, а дополнительным или сменным рабочим оборудованием приводит к появлению нетипичных отказов и снижению показателей надежности ЗТМ в целом. Так, например, эксплуатация автогрейдера среднего типа на операциях распределения штабелированного щебня в течение 1,5 месяца привела к выходу машины в капитальный ремонт. Во время опроса оператора было выяснено, что работы выполнялись преимущественно бульдозерным отвалом, а основной отвал использовался эпизодически. При обследовании машины были обнаружены значительные усталостные трещины в основной раме (рис. 2, а). Данный тип отказов является типичным для автогрейдеров, однако скорость роста трещин была существенно выше ожидаемой. Обычно трещины такого размера появляются после нескольких лет эксплуатации машины. Кроме трещин было зафиксировано и разрушение элементов рулевого управления (рис. 2, б, в), что атипично для машин данного класса.

Подводя итог анализу воздействия различных факторов на условия нагружения ЗТМ, можно утверждать, что их вариация приводит к:

– изменению координат приложения главного вектора внешней нагрузки ΣW (рис 3, а);

– изменению направления главного вектора внешней нагрузки ΣW (рис 3, б);

– изменению временной характеристики внешней нагрузки ΣW (рис 3, в).



а



б



в

Рис. 2. Отказы автогрейдера, вызванные работой бульдозерным отвалом: а – усталостная трещина в основной раме; б, в – разрушение элементов рулевого управления

Подводя итог сказанному выше, можно утверждать, что изменение условий нагружения ЗТМ, вызванные сменой рабочего оборудования, вида выполняемой технологической операции, этапа рабочего цикла машины, скорости выполнения рабочей операции, типа обрабатываемого материала

приводят к изменению параметров нагружения как самой ЗТМ, так и отдельных ее узлов.

Эксперименты показывают, что вариация частоты и амплитуды действующих при этом нагрузок происходит в очень широких пределах.

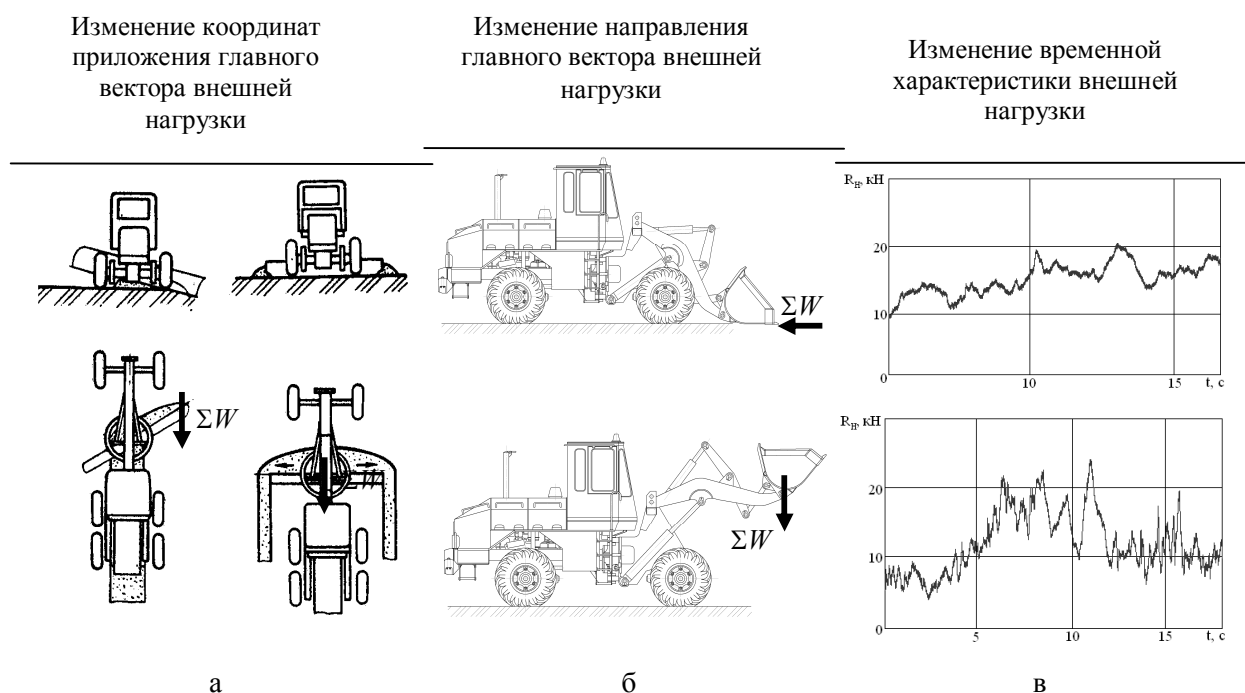


Рис. 3. Общие результаты вариации условий нагружения ЗТМ

Такая сложная смена режимов нагружения способна привести к изменению значений основных критериев качества машины: производительности, показателей надежности, энергетических и экономических показателей, показателей качества работы и т.д. [13, 14]. С нашей точки зрения, проблема адаптации ЗТМ к действующим внешним нагрузкам заключается в том, что она должна соответствовать заданным уровням значений критериев независимо от вида и параметров выполняемой технологической операции.

Общая структурная схема процесса адаптации ЗТМ к условиям внешнего нагружения

Исходя из вышесказанных замечаний, предлагаемая общая структурная схема процесса адаптации выглядит так, как представлено на рис. 4.

Наиболее важным элементом схемы является пространство допустимых динамических состояний ЗТМ, границы которого определяются назначенными значениями критериев адаптации машины. Само пространство включает в себя многофакторный комплекс

допустимых параметров действующих нагрузок, удовлетворяющих заданному уровню критериев. Определить границы такого пространства можно, если описать критерии адаптации неравенствами, учитывающими не только показатели обрабатываемой среды и виды выполняемых технологических операций, но и геометрические, кинематические и динамические параметры самой машины.

Таким образом, определение границ пространства допустимых динамических состояний ЗТМ и процесс принятия решений по ее адаптации к переменным условиям нагружения сводится к решению задачи многокритериальной оптимизации [15].

Формально предлагаемая структурная схема может быть описана следующим образом. Пространство допустимых динамических состояний ЗТМ (X^m) представляет собой множество показателей силового нагружения (x_1, x_2, \dots, x_m)

$$X^m = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}, \quad (5)$$

удовлетворяющих целевой функции

$$\Phi = \begin{cases} K_1(x_1, x_2, \dots, x_m) \geq K_{1н} \\ K_2(x_1, x_2, \dots, x_m) \geq K_{2н} \\ \vdots \\ K_i(x_1, x_2, \dots, x_m) \geq K_{iн} \\ K_{i+1}(x_1, x_2, \dots, x_m) \leq K_{(i+1)н} \\ \vdots \\ K_n(x_1, x_2, \dots, x_m) \leq K_{нн} \end{cases} \quad (6)$$

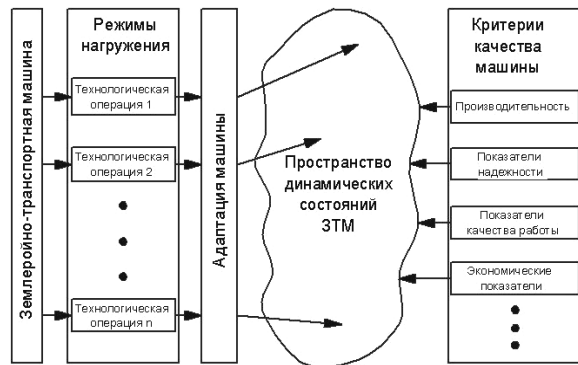


Рис. 4. Общая структурная схема процесса адаптации ЗТМ к условиям внешнего нагружения

В приведенных зависимостях K_1, \dots, K_n – критерии адаптации; $K_{1н}, \dots, K_{нн}$ – нормативные значения критериев адаптации.

Процесс адаптации сводится к изменению геометрических (a_j), кинематических (b_j), динамических (c_j) и эксплуатационных (d_j) показателей ЗТМ таким образом, чтобы множество Y^m параметров реального нагружения являлось частью множества X^m : $Y^m \subset X^m$.

$$Y^m = \begin{cases} x_1 = f_1(a_1, \dots, a_j, b_1, \dots, b_j, c_1, \dots, c_j, d_1, \dots, d_j) \\ x_2 = f_2(a_1, \dots, a_j, b_1, \dots, b_j, c_1, \dots, c_j, d_1, \dots, d_j) \\ \vdots \\ x_m = f_m(a_1, \dots, a_j, b_1, \dots, b_j, c_1, \dots, c_j, d_1, \dots, d_j) \end{cases} \quad (7)$$

Значительное количество критериев, их противоречивость существенно усложняют данное решение, а иногда делают его весьма проблематичным. Вместе с тем, опрос специ-

алистов эксплуатирующих организаций показывает, что для разных типов ЗТМ в различных условиях работы выдвигается ограниченное количество требований к критериям адаптации машины. Это позволяет из общего списка критериев выделить несколько доминирующих (наиболее важных) и все последующие математические операции выполнять только с их учетом. Задача в этом случае несколько упрощается.

Для реализации процесса адаптации возможно использование двух подходов – аналитического и экспериментального.

Аналитический подход предполагает разработку обобщенной динамической модели ЗТМ в виде системы дифференциальных уравнений движения.

Выбор регулируемых параметров ЗТМ и границ их варьирования базируется на качественном и численном анализе разработанной обобщенной модели. Ввиду большого разнообразия ЗТМ и значительного объема вычислений реализация данного подхода возможна только при разработке специализированного программного обеспечения.

Экспериментальный подход позволяет реализовать адаптацию машины «на лету» в процессе выполнения конкретной технологической операции. Проблемы такого подхода сводятся к решению следующих задач:

- разработка информационно-измерительной системы, имеющей обоснованное количество источников информации (датчиков) и мест их установки для полного описания условий нагружения ЗТМ и ее узлов;
- конструктивное обеспечение набора параметров машины, вариация которых оказывает наибольшее влияние на условия нагружения;
- интеллектуализация системы адаптации, заключающаяся в разработке самообучающегося программного комплекса, позволяющего в условиях воздействия случайных нагрузок с детерминированным трендом оперативно принимать рациональные решения по модификации ЗТМ в рамках набора регулируемых параметров.

Таким образом, техническая реализация системы адаптации позволит оперативно модифицировать серийно выпускаемые ЗТМ в соответствии с условиями их нагружения.

Выводы

Условия внешнего нагружения ЗТМ и ее узлов определяются целым рядом факторов, основными из которых являются: параметры обрабатываемого материала; вид и показатели выполняемой технологической операции; геометрические, кинематические и динамические параметры самой машины.

Комплекс критериев адаптации ЗТМ позволяет определить пространство допустимых динамических состояний машины, удовлетворяющее заданным значениям критериев.

Основной задачей адаптации машины является преобразование ее геометрических, кинематических, динамических и эксплуатационных параметров, позволяющее независимо от вида и способа выполнения технологической операции обеспечить гарантированное попадание в пространство допустимых динамических состояний ЗТМ.

Литература

1. Тертычный-Даури В.Ю. Адаптивная механика / В.Ю. Тертычный-Даури. – М.: «Факториал Пресс», 2003. – 464 с.
2. Тюкин И.Ю. Адаптация в нелинейных динамических системах / И.Ю. Тюкин, В.А. Терехов. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 384 с.
3. Мещеряков В.А. Нейросетевая динамическая модель рабочего процесса землеройной машины / В.А. Мещеряков // Межвузовский сборник трудов молодых ученых, аспирантов и студентов. – 2004. – Вып. 1, Ч. 1. – С. 135–141.
4. Мещеряков В.А. Адаптивное управление рабочими процессами землеройно-транспортных машин: автореф. дис. на соиск. уч. степени доктора технических наук: спец. 05.05.04 «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины» / Мещеряков Виталий Александрович. – Омск, 2007. – 42 с.
5. Бузин Ю.М. Пути повышения эффективности работы автогрейдеров / Ю.М. Бузин // Строительные и дорожные машины. – 1986. – № 10. – С. 2–3.
6. Проектирование машин для земляных работ / под ред. А.М. Холодова. – Х.: Вища школа, 1986. – 272 с.
7. Ксенович И.П. Аспекты проектирования сложных вероятностных нелинейных динамических неголомомных систем / И.П. Ксенович // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2007. – № 8. – С. 45–48.
8. Федоров Д.И. Рабочие органы землеройных машин / Д.И. Федоров. – М.: Машиностроение, 1989. – 368 с.
9. Наукові основи створення вискоелективних землерійно-транспортних машин / І.Г. Кириченко, Л.В. Назаров, В.В. Нічка та ін. – Х.: ХНАДУ, 2003. – 588 с.
10. Нічка В.В. Надійність прицепного і навісного обладнання тракторів / В.В. Нічка. – Х.: Вища школа, 1985. – 152 с.
11. Завьялов Л.М. Взаимодействие дорожных и строительных машин с контактной средой: монография / Л.М. Завьялов, М.А. Завьялов, В.Н. Кузнецова. – Омск: Полиграфический центр КА11, 2011. – 370 с.
12. Лизунков А.В. Особенности нагружения металлоконструкций автогрейдера при выполнении различных рабочих операций / А.В. Лизунков, В.А. Шевченко, А.А. Резников // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. – 2010. – Вип. 23. – С. 280–286.
13. Брауде В.И. Надійність під'ємно-транспортних машин / В.И. Брауде, Л.Н. Семенов. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отд-ние, 1986. – 184 с.
14. Краснокутський В.М. Якість будівельних і дорожніх машин / В.М. Краснокутський, І.Г. Пімонов, Г.Г. Пімонов. – Х.: ХНАДУ, 2011. – 276 с.
15. Дубров Ю.А. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем / Ю.А. Дубров, С.И. Травкин, В.Н. Якимец. – М.: Наука, 1986. – 296 с.

Рецензент: А.В. Полярус, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 21 марта 2016 г.