



АВТОМАТИЧНІ І АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

УДК 62-503.56:681.5.013

РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ БУРОВЫМ СУДНОМ В РЕЖИМЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Robust control of drillship in dynamic positioning mode taking into account functional limitations

Тимченко В.Л.¹, Ухин О.А.¹ (Timchenko V.L., Ukhin O.A.)

¹Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев,
E-mail: vl.timchenko@mail.ru

DOI: [10.15673/](https://doi.org/10.15673/)

Аннотация

Рассмотрено решение проблемы повышения уровня и качества робастного управления буровым судном в режиме динамического позиционирования на основе систем с переменной структурой обратных связей с учетом функциональных ограничений. Для обеспечения требуемого уровня инвариантности системы динамического позиционирования к параметрической неопределенности математической модели бурового судна разработан робастный контур, корректирующий сигнал которого формируется на основе рассогласования выходных переменных реальной системы и эталонной модели. Приведены результаты моделирования, которые демонстрируют эффективность предложенного подхода.

Abstract

The solution of the problem of improving the level and quality of robust control of drillship in dynamic positioning mode based on systems with variable feedback structure taking into account functional limitations is considered. Robust channel was added to control system to ensure the required level of invariance to parametrical uncertainty of mathematical model of drillship. Correction signal of robust channel is generated based on mismatch of the output variables of the real system and reference model. The results of simulations that demonstrate the effectiveness of the proposed approach are given.

Ключевые слова

Динамическое позиционирование, робастное управление, переменная структура обратных связей.

Постановка проблемы

С началом освоения шельфа мирового океана и ростом объемов добычи углеводородного сырья широкое развитие получили системы динамического позиционирования (ДП) судов, которые позволяют удерживать объект в заданной точке. В зависимости от глубины проведения работ в настоящее время применяют в основном два способа удержания судна: статические системы позиционирования (якорные системы удержания) и системы ДП. Данные системы позволяют выполнять различные технологические задачи: бурение скважин для добычи углеводородного сырья в прибрежных зонах, обслуживание буровых платформ и оффшорных ветряных электростанций, выполнение дноуглубительных работ, прокладку кабелей и трубопроводов, обеспечение водолазных работ, швартовку судов и многие другие. В зависимости от выполняемой задачи используются суда с различной конфигурацией пропульсивных комплексов, включающих продольные, поперечные и азимутальные движители.

**АВТОМАТИЧНІ І АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

Основные принципы и методы управления судами в режиме ДП сформулированы в трудах В.П. Шостака, Ю.А. Лукомского, В.С. Чугунова, Л.Л. Вагущенко, Х. Фея, И.Р. Фрейдзона, Г.Г. Холодова, Ю.И. Юдина, Дж. Холвика, Т. Perez., Т. Fossen и других ученых, например в ряде работ [1-3].

Анализ существующих систем ДП показал, что данные системы схожи между собой по своему функциональному составу и принципу действия, что продиктовано требованиями международных судоводных регистров. Также были выявлены следующие недостатки: стабилизация судна в центре позиционирования или на заданной траектории происходит без предварительного планирования оптимальной траектории по каждой управляемой переменной; применение ПИД регуляторов, несмотря на их известные недостатки с точки зрения повышенных затрат энергии управления, а также громоздкость использования классических методов оптимального управления с учетом высокой размерности системы.

Обеспечение движения по оптимальным траекториям стабилизации и точного позиционирования бурового судна в условиях неопределенности и с учетом функциональных ограничений основано на усовершенствовании и практической реализации принципов робастно-оптимального управления [4], которое обеспечивает решение соответствующих функциональных задач в режиме реального времени. Таким образом, при исследовании вопроса робастного управления буровым судном в режиме ДП с учетом функциональных ограничений актуальна задача развития и применения современных методов управления, которые позволяют сформировать оптимальные физически реализуемые управляющие воздействия для компенсации значительных внешних возмущений.

Цель

Робастное управление буровым судном в режиме ДП путем формирования оптимальных (субоптимальных) траекторий стабилизации с учетом функциональных ограничений на основе систем с переменной структурой обратных связей.

Изложение основного материала

Автоматизированная система ДП представляет собой сложную по структуре систему и состоит из следующих функциональных блоков: блока определения координат положения судна (БОКПС), блока определения информации об окружающей среде (БОИОС), блока управления динамическим позиционированием (БУДП), пропульсивного комплекса (ПК), блока контроля процесса динамического позиционирования (БКПДП), блока задания координат центра (траектории) позиционирования (БЗКЦП), автоматизированного пульта управления (АПУ) и блока энергоснабжения системы (БЭС).

БОКПС должен содержать в своём составе следующие основные компоненты: системы определения географического местоположения судна и системы точного определения позиции судна.

БУДП является основным элементом системы, так как на основе полученной информации от БОКПС, БОИОС и БКПДП формируется оптимальная траектория движения судна или перехода в центр позиционирования и соответствующие управляющие сигналы пропульсивным комплексом. Данный блок состоит из следующих элементов: эталонной математической модели судна (ЭММС), модуля формирования оптимальной траектории перехода в центр позиционирования (МФОТ), модуля определения моментов переключения управляющих воздействий (МОМП), модуля формирования оптимальных управляющих воздействий (МФОУВ) и модуля выработки корректирующего сигнала (МВКС).

ЭММС представляет собой математическую модель судна, которая включает все известные и измеримые параметры судна и внешних возмущений. БКПДП передаёт информацию об отклонении судна от центра позиционирования в БУДП. На основе полученных данных и с учётом ограничений на управляющие воздействия в МФОТ формируются оптимальные траектории перехода с текущего положения судна в заданное, а также моменты переключения управляющих воздействий на основе специально разработанной процедуры построения алгоритмов формирования оптимальных по быстродействию траекторий [5]. В МФОУВ на основе метода систем с переменной структурой обратных связей и с учётом сформированных траекторий и данных, полученных от БОИОС, вырабатываются оптимальные управляющие сигналы.

МВКС выполняет функцию канала внутренней обратной связи и формирует сигнал, который позволяет компенсировать влияние неизмеримых внешних воздействий, а также неопределённостей, входящих в состав физического объекта управления. Значения выходных управляемых координат системы с эталонной моделью судна сравниваются с реальными значениями, и на основе полученных отклонений от запланированной оптимальной траектории формируется корректирующий сигнал. Соответствующие оптимальные управляющие воздействия и корректирующие сигналы суммируются и поступают на ПК.

БКПДП выполняет роль триггера. Данный блок сравнивает информацию, полученную от БОКПС, с координатами центра позиционирования, при этом, если отклонение судна превышает 30% от радиуса круга безопасности, тогда данные передаются в БУДП. В свою очередь БУДП подаёт сигнал на БКПДП, который



АВТОМАТИЧНІ І АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

переходит из режима сравнения в режим ожидания до момента получения сигнала о завершении процесса стабилизации.

АПУ обеспечивает оператора текущей информацией о состоянии и положении судна, действующих внешних возмущениях, состоянии всех систем. С помощью АПУ оператор задаёт координаты центра позиционирования, значения интенсивности нерегулярного волнения для определения параметров формирующего фильтра [2], а также имеет возможность перехода из автоматического режима управления в ручной режим. Важно отметить, что АПУ сигнализирует об отказе систем, что позволяет оператору быстро отреагировать на сбой системы.

ПК может состоять из различных комбинаций маршевых двигателей и подруливающих устройств. От мощности и количества движителей зависит конфигурация БЭС.

Взаимодействие перечисленных блоков представляет собой структурно-функциональную схему судовой автоматизированной системы ДП (рис. 1).

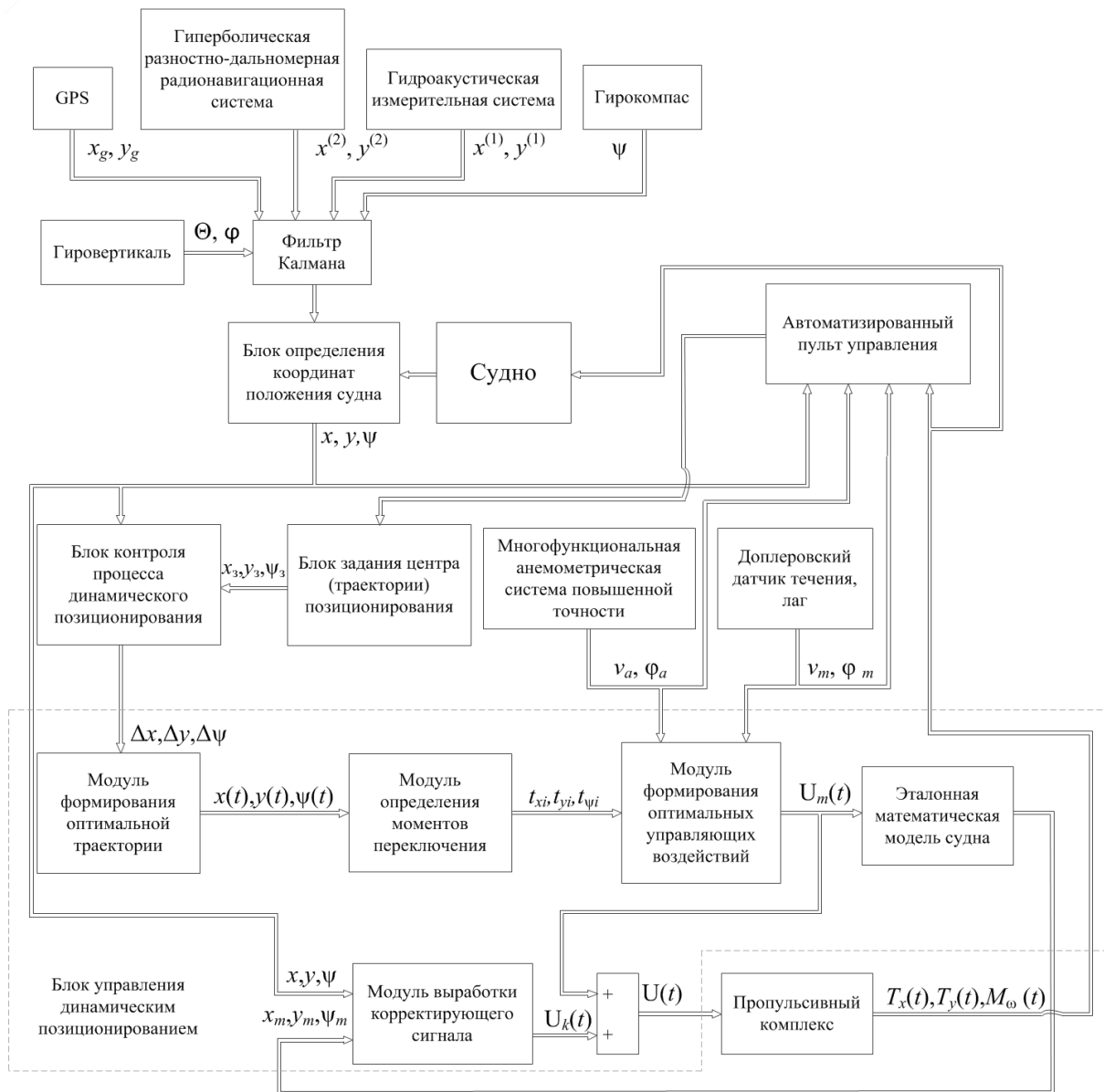


Рис. 1. Структурно-функциональная схема судовой автоматизированной системы ДП

В процессе стабилизации бурового судна в режиме ДП необходимо учитывать существующие функциональные ограничения. Данные ограничения включают условия работоспособности, имеющие принципиальное значение при оценке правильности функционирования судна, исходя из его назначения.



АВТОМАТИЧНІ І АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

В процессе бурения судно должно находиться над скважиной. Возможное отклонение судна от точки бурения продиктовано ограничением максимально допустимого отклонения бурового инструмента от вертикального положения. Исходя из условий прочности, угол отклонения от вертикального положения η не должен превышать $3-5^\circ$ [1,2]. Максимально допустимый угол наклона бурового инструмента накладывает ограничение на максимально возможное отклонение судна от центра позиционирования, таким образом, формируется определенный круг безопасности (рис. 2), радиус которого находится по формуле

$$R_{\text{доп}} = h \cdot \text{tg}(\eta) = (0.05 \div 0.1)h.$$

$$v_{x \max}^{(n)}(0) = a_{11}^{(n-1)} v_x^{(n-1)}(0) + a_{12}^{(n-1)} v_y^{(n-1)}(0) + a_{13}^{(n-1)} \omega^{(n-1)}(0) + b_{11}^{(n-1)} T_{x \max}^{(n-1)}(0) + c_{11}^{(n-1)} f_x^{(n-1)}(0);$$

$$v_{y \max}^{(n)}(0) = a_{21}^{(n-1)} v_x^{(n-1)}(0) + a_{22}^{(n-1)} v_y^{(n-1)}(0) + a_{23}^{(n-1)} \omega^{(n-1)}(0) + b_{22}^{(n-1)} T_{y \max}^{(n-1)}(0) + c_{22}^{(n-1)} f_y^{(n-1)}(0);$$

$$\omega_{\max}^{(n)}(0) = a_{31}^{(n-1)} v_x^{(n-1)}(0) + a_{32}^{(n-1)} v_y^{(n-1)}(0) + a_{33}^{(n-1)} \omega^{(n-1)}(0) + b_{32}^{(n-1)} T_{y \max}^{(n-1)}(0) + b_{33}^{(n-1)} M_{\omega \max}^{(n-1)}(0) + c_{33}^{(n-1)} m_{\omega}^{(n-1)}(0).$$

Основной задачей ДП является удержание судна в круге безопасности и уменьшение отклонения от центра позиционирования, которое определяется при условии, что начало системы координат находится в центре позиционирования

$$R_r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (1)$$

где x, y – текущие координаты положения бурового судна.

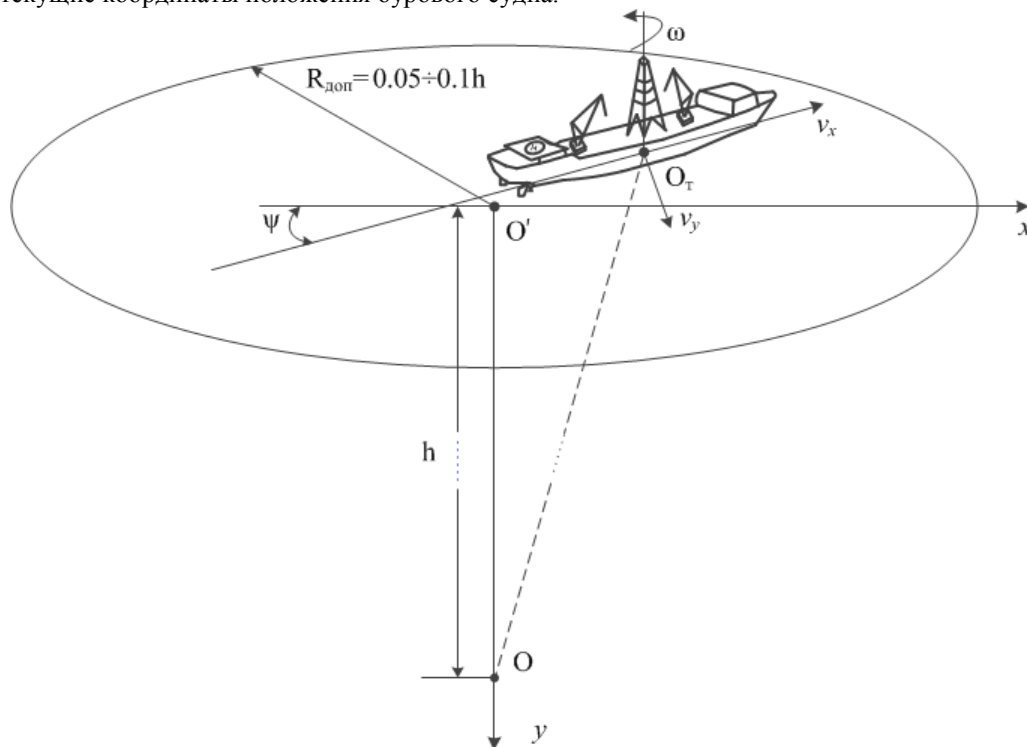


Рис. 2. Круг безопасности бурового судна.

На основе уравнения (1) определяются следующие условия для процесса позиционирования

$$\begin{cases} \sqrt{x^2 + y^2} \leq R_{\text{доп}}; \\ \sqrt{x^2 + y^2} \rightarrow \min. \end{cases}$$

К функциональным ограничениям, влияющим на процесс позиционирования судна, также относится физическая реализуемость управляющих воздействий, так как от порядка наивысшей производной управляющих воздействий зависит вид траекторий стабилизации судна в центр позиционирования.

**АВТОМАТИЧНІ І АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

Ограничения, наложенные на начальные значения управляющих воздействий, влияют на максимальные значения производных управляемых координат в начальный момент времени или в моменты переключения управления при переходе на следующий отрезок траектории стабилизации бурового судна. Максимальные значения высших производных вектора скоростей при условии ненулевых соответствующих производных вектора управляющих воздействий определяются из уравнений динамики бурового судна [1,2]

$$\begin{aligned}\dot{v}_x(t) &= a_{11}v_x(t) + a_{12}v_y(t) + a_{13}\omega(t) + b_{11}T_x(t) + c_{11}f_x(t); \\ \dot{v}_y(t) &= a_{21}v_x(t) + a_{22}v_y(t) + a_{23}\omega(t) + b_{22}T_y(t) + c_{22}f_y(t); \\ \dot{\omega}(t) &= a_{31}v_x(t) + a_{32}v_y(t) + a_{33}\omega(t) + b_{32}T_y(t) + b_{33}M_\omega(t) + c_{33}m_\omega(t).\end{aligned}\quad (2)$$

путем подстановки начальных значений управляемых координат и управляющих сигналов

Современные алгоритмы построения прикладных систем управления основываются на использовании систем управления с обратными связями. Для обеспечения процесса управления судном предлагается формировать управляющие воздействия на основе систем с переменной структурой обратных связей, так как данный подход позволяет обеспечить оптимальное управление и избежать ряда значительных вычислительных сложностей при решении многомерных краевых задач. Данный подход включает следующие основные этапы: формирование оптимальной (субоптимальной) по быстродействию траектории с учетом максимальных параметров управляющих воздействий; определение моментов переключения управляющих функций в цепях обратных связей объекта; синтез управляющих функций в соответствующих цепях обратных связей многомерного объекта.

Планирование оптимальной траектории для заданных граничных условий заключается в определении требуемого количества отрезков траектории с постоянными значениями соответствующих производных координат состояния, а также моментов времени переключения управляющих функций в цепях обратных связей при переходе из начального отрезка на заданный отрезок траектории. При этом используется обобщенный вывод относительно прямых условий оптимальности для практического построения траекторий стабилизации бурового судна при позитивных значениях производных вектора координат состояния [6]. Траектория для заданных граничных условий будет оптимальной по быстродействию при движении с максимально возможным количеством возможных максимальных значений производных вектора координат состояния, с учетом ограничений на управляющее воздействие.

В векторно-матричной форме уравнение (2) запишется [5]

$$\dot{\mathbf{V}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{V}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t) + \mathbf{C}\mathbf{F}(t), \quad (3)$$

где $\mathbf{V}(t) = [v_x(t) \ v_y(t) \ \omega(t)]^T$ – вектор координат состояния; $\mathbf{U}(t) = [T_x(t) \ T_y(t) \ M_\omega(t)]^T$ – вектор управляющих сил и момента; $\mathbf{F}(t) = [f_x(t) \ f_y(t) \ m_\omega(t)]^T$ – вектор измеримых сил и момента внешних сил;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{33} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \text{ – матрицы коэффициентов.}$$

Для определения управляющих воздействий, например, для системы с ограничением $\ddot{\mathbf{V}}(t) = 0$, про дифференцируем уравнение (3)

$$\mathbf{A}^2\mathbf{V}(t) + \mathbf{A}\mathbf{B}\mathbf{U}(t) + \mathbf{B}\dot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{A}\mathbf{C}\mathbf{F}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{F}}(t) = 0. \quad (4)$$

Векторно-матричные преобразования уравнения (4) и применение преобразования Лапласа с учетом заданных начальных условий, а также внешнего измеримого возмущения, формируют управляющие функции для начального отрезка в виде

$$\mathbf{U}(p) = -\mathbf{B}^{-1}(p\mathbf{I} + \mathbf{A})^{-1}[\mathbf{A}^2\mathbf{V}(p) - \mathbf{B}\mathbf{U}_0 + (p\mathbf{I} + \mathbf{A})\mathbf{C}\mathbf{F}(p) - \mathbf{C}\dot{\mathbf{F}}_0];$$

Для определения управляющих воздействий системы для условия $\ddot{\mathbf{V}}(t) = 0$ про дифференцируем уравнение (4)

$$\mathbf{A}^3\mathbf{V}(t) + \mathbf{A}^2\mathbf{B}\mathbf{U}(t) + \mathbf{A}\mathbf{B}\dot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{B}\ddot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{A}^2\mathbf{C}\mathbf{F}(t) + \mathbf{A}\mathbf{C}\dot{\mathbf{F}}(t) + \mathbf{C}\ddot{\mathbf{F}}(t) = 0. \quad (5)$$

Применив преобразование Лапласа к (5) с учетом заданных начальных условий и внешнего измеримого возмущения получим выражения в операторной форме для управляющего воздействия в виде

$$\begin{aligned}\mathbf{U}(p) &= -\mathbf{B}^{-1}(p^2\mathbf{I} + p\mathbf{A} + \mathbf{A}^2)^{-1}[\mathbf{A}^3\mathbf{V}(p) - (p\mathbf{I} + \mathbf{A})\mathbf{B}\mathbf{U}_0 - \mathbf{B}\ddot{\mathbf{U}}_0 + \\ &+ (p^2\mathbf{I} + p\mathbf{A} + \mathbf{A}^2)\mathbf{C}\mathbf{F}(p) - (p\mathbf{I} + \mathbf{A})\mathbf{C}\dot{\mathbf{F}}_0 - \mathbf{C}\ddot{\mathbf{F}}_0];\end{aligned}$$



АВТОМАТИЧНІ І АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

Необходимые начальные значения управляющих функций для обеспечения движения объекта управления с заданными начальными условиями по соответствующему отрезку траектории получим из следующих соотношений

$$\mathbf{U}_0 = \mathbf{B}^{-1}[\dot{\mathbf{V}}(0) - \mathbf{A}\mathbf{V}(0) - \mathbf{C}\mathbf{F}(0)], \quad \dot{\mathbf{U}}_0 = \mathbf{B}^{-1}[\ddot{\mathbf{V}}(0) - \mathbf{A}\dot{\mathbf{V}}(0) - \mathbf{C}\dot{\mathbf{F}}(0)].$$

Для общего случая нулевой производной вектора фазовых координат k -го порядка $\mathbf{V}^{(k)}(t) = 0$, приняв нулевые начальные значения внешнего измеримого возмущения, в результате соответствующих векторно-матричных преобразований, вектор управляющих функций запишется в виде

$$\mathbf{U}(p) = -\mathbf{B}^{-1}\mathbf{A}_k^{-1}[\mathbf{A}^k\mathbf{V}(p) - \mathbf{U}_0(p) + \mathbf{A}_k\mathbf{C}\mathbf{F}]$$

Робастные свойства системы по отношению к неполной информации о параметрах математической модели судна и внешним неизмеримым воздействиям обеспечиваются путем формирования дополнительных сигналов управления из системы с эталонной моделью судна с переменной структурой обратных связей и корректирующих сигналов робастного контура. Значения управляемых переменных системы с эталонной моделью сравниваются со значениями управляемых переменных реальной системы управления, в результате чего формируется рассогласование системы, на основе которого, а также обобщенных условий для ошибки системы формируется корректирующий сигнал системы. Управляющий сигнал для физического объекта представляет собой сумму управляющего сигнала системы с эталонной моделью и корректирующего сигнала. Данный подход позволяет существенно повысить точность управления и снизить затраты энергии [5,6], так как использование дополнительного эталонного сигнала управления $\mathbf{U}_m(t)$ позволяет повысить точность управления без увеличения коэффициентов усиления корректирующего контура $\mathbf{U}_k(t)$.

Дифференциальное уравнение динамики судна с учётом робастного контура примет вид [5]:

$$\dot{\mathbf{V}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{V}(t) + \mathbf{B}[\mathbf{U}_m(t) + \mathbf{U}_k(t)] + \mathbf{C}\mathbf{F}(t), \quad (6)$$

$$\text{где } \mathbf{U}_m(t) = \begin{pmatrix} T_{xm}(t) \\ T_{ym}(t) \\ M_{\omega m}(t) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{U}_k(t) = \begin{pmatrix} T_{xk}(t) \\ T_{yk}(t) \\ M_{\omega k}(t) \end{pmatrix}.$$

Для эталонной модели запишем:

$$\dot{\mathbf{V}}_m(t) = \mathbf{A}\mathbf{V}_m(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}_m(t) + \mathbf{C}\mathbf{F}(t). \quad (7)$$

При определении корректирующего сигнала на основе линейных уравнений (6, 7) получим приближенное выражение для вектора ошибок $\mathbf{E}(t)$

$$\dot{\mathbf{E}}(t) \approx \mathbf{A}\mathbf{E}(t) - \mathbf{B}\mathbf{U}_k(t). \quad (8)$$

Зададим условия для обобщенной ошибки системы стабилизации в виде

$$\ddot{\mathbf{E}} + \mathbf{G}_1\dot{\mathbf{E}} + \mathbf{G}_2\mathbf{E} = 0, \quad (9)$$

где \mathbf{G}_1 , \mathbf{G}_2 – матрицы весовых коэффициентов, которые определяются в процессе отладки системы.

На основе (8, 9) получим зависимость корректирующего сигнала $\mathbf{U}_k(p)$ от ошибки системы при условии $\mathbf{U}_k(0) = 0$

$$\mathbf{U}_k(p) = \mathbf{W}_k(p)\mathbf{E}(p), \quad (10)$$

где $\mathbf{W}_k(p) = \mathbf{B}^{-1}(p\mathbf{I} + \mathbf{A} + \mathbf{G}_1)^{-1}(\mathbf{A}^2 + \mathbf{A}\mathbf{G}_1 + \mathbf{G}_2)$ – матричная передаточная функция [5].

В работе было исследовано влияние параметрической неопределенности на процесс управления. Для этого в ходе моделирования работы системы для заданных граничных условий $x(0) = 15$ м; $v_x(0) = 0,2$ м/с; $y(0) = 10$ м; $v_y(0) = 0,06$ м/с; $\psi(0) = 0,1$ рад; $\omega(0) = 0,01$ рад/с; $x(T) = 0$; $v_x(T) = 0$; $y(T) = 0$; $v_y(T) = 0$; $\psi(T) = 0$; $\omega(T) = 0$;

$|\dot{v}_{x\max}(t)| \leq 0,2$ м/с²; $|\dot{v}_{y\max}(t)| \leq 0,06$ м/с²; $|\dot{\omega}_{\max}(t)| \leq 0,001$ рад/с², параметры математической модели бурового

судна изменялись в пределах $\pm 10\%$ от номинальных значений. Результаты моделирования, приведенные в табл. 1. показали, что ошибка системы, а также среднеквадратическое отклонение от заданной траектории не превышают 5%.

**АВТОМАТИЧНІ І АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

Таблица 1 – Зависимость ошибки системы и среднеквадратичного отклонения от заданной траектории при изменении параметров математической модели бурового судна

	-5%		+5%		-10%		+10%	
	$\varepsilon, \%$	$\bar{\varepsilon}_{cp}$	$\varepsilon, \%$	$\bar{\varepsilon}_{cp}$	$\varepsilon, \%$	$\bar{\varepsilon}_{cp}$	$\varepsilon, \%$	$\bar{\varepsilon}_{cp}$
$x, \text{ м}$	-2,44	0,128	-3,08	0,148	-2,12	0,118	-3,4	0,158
$v_x, \text{ м/с}$	-2,35	$4,36 \cdot 10^{-3}$	-2,91	$5,16 \cdot 10^{-3}$	-2,07	$4,16 \cdot 10^{-3}$	-3,18	$5,68 \cdot 10^{-3}$
$y, \text{ м}$	-0,53	0,024	-1,18	0,051	-0,2	0,015	-1,5	0,066
$v_y, \text{ м/с}$	-2,834	$1,038 \cdot 10^{-3}$	-4,06	$1,656 \cdot 10^{-3}$	-2,22	$7,98 \cdot 10^{-4}$	-4,64	$1,992 \cdot 10^{-3}$
$\psi, \text{ рад}$	-0,36	$4,2 \cdot 10^{-4}$	-2,36	$6 \cdot 10^{-4}$	0,65	$8,6 \cdot 10^{-4}$	-3,36	$1,03 \cdot 10^{-3}$
$\omega, \text{ рад/с}$	-0,35	$2,8 \cdot 10^{-5}$	-0,32	$3,4 \cdot 10^{-5}$	-0,66	$8,7 \cdot 10^{-5}$	-0,31	$4,3 \cdot 10^{-5}$

Выводы

В работе приведена усовершенствованная структура построения судовой системы ДП, которая включает в свой состав модуль формирования оптимальных траекторий, что позволяет формировать оптимальные траектории стабилизации бурового судна в центре позиционирования. Анализ функциональных ограничений показал, что данные ограничения определяют области допустимых значений управляемых координат, и формируют ограничения на управляющие воздействия и вид траекторий стабилизации. В работе приведен подход, позволяющий синтезировать управляющие воздействия системы динамического позиционирования на основе систем с переменной структурой обратных связей. В условиях неполной информации о модели судна в состав системы введен робастный контур, который позволяет обеспечить требуемый уровень инвариантности к параметрической неопределенности. На основе результатов моделирования системы был определен интервал робастности в пределах изменения порядка 10% от параметров эталонной модели бурового судна.

Литература

1. Шостак В.П. Динамическое позиционирование плавучих объектов: монография / В.П. Шостак. – Чикаго: Мегатрон, 2010. – 130 с.
2. Лукомский, Ю.А. Системы управления морскими подвижными объектами / Ю.А. Лукомский, В.С. Чугунов — Л.: Судостроение, 1988. — 272 с.
3. Perez T., Fossen T. Kinematic models for maneuvering and seakeeping of marine vessels / T Perez., T Fossen // J. Modeling, identification and control. 2007. Vol. 28, No.1 P. 19-30.
4. Кунцевич В.М. Синтез робастно - оптимальных систем управления нестационарными объектами при ограниченных возмущениях / В.М. Кунцевич // Проблемы управления и информатики. — К., 2004. — №2 — С.19—31.
5. Тимченко В.Л. Моделирование процессов стабилизации морского подвижного объекта в режиме динамического позиционирования / В.Л. Тимченко, О.А. Ухин // Проблемы управления и информатики. — Киев, 2014. — № 4. — С. 77–88.
6. Тимченко, В.Л. Робастная стабилизация морских подвижных объектов на основе систем с переменной структурой обратных связей / В.Л. Тимченко, Ю. П. Кондратенко // Проблемы управления и информатики. – К., 2011. – № 3 – С. 79–92.

References

1. Shostak V.P. Dinamicheskoe pozicionirovanie plavuchih ob'ektov: monografija / V.P. Shostak. – Chikago: Megatron, 2010. – 130 s.
2. Lukomskij, Ju.A. Sistemy upravlenija morskimi podvizhnymi ob'ektami / Ju.A. Lukomskij, V.S. Chugunov — L.: Sudostroenie, 1988. — 272 s.
3. Perez T., Fossen T. Kinematic models for maneuvering and seakeeping of marine vessels / T Perez., T Fossen // J. Modeling, identification and control. 2007. Vol. 28, No.1 P. 19-30.



АВТОМАТИЧНІ І АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

4. Kuncovich V.M. Sintez roblastno - optimal'nyh sistem upravlenija nestacionarnymi ob#ektami pri ogranichennyh vozmushhenijah / V.M. Kuncovich // Problemy upravlenija i informatiki. — K., 2004. — №2 — S.19—31.
5. Timchenko V.L. Modelirovanie processov stabilizacii morskogo podvizhnogo ob#ekta v rezhime dinamicheskogo pozicionirovanija / V.L. Timchenko, O.A. Uhin // Problemy upravlenija i informatiki. — Kiev, 2014. — № 4. — S. 77–88.
6. Timchenko, V.L. Robastnaja stabilizacija morskikh podvizhnyh ob#ektov na osnove sistem s peremennoj strukturoj obratnyh svjazej / V. L. Timchenko, Ju. P. Kondratenko // Problemy upravlenija i informatiki. — K., 2011. — № 3 — S. 79–92.

Отримано в редакцію: 11.08.2015 р./ Прийнято до друку: 01.09.2015 р./ Received by edition: 11.08.2015. Approved for the press: 01.09.2015

УДК [621.867.3:622.612]:658.5

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАГРУЗКИ ПТЛ ЭЛЕВАТОРОВ ЗЕРНОМ НА ОСНОВЕ САУ С КОММУТИРУЕМОЙ СТРУКТУРОЙ

Optimization of loading grain elevators PTL based ACS with a switched structure

Шестопапов С.В.¹, Хобин В.А.²

²Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса



DOI: 10.15673/

Аннотация

Логистика движения зерна от производителя к потребителю – это логистика его перемещения между элеваторами различного назначения и объема хранения. Практика показывает, что в среднем в этой логистической цепи задействованы три – четыре элеватора. Основным и достаточно энергоемким процессом для всех элеваторов является процесс его перемещения поточно-транспортными линиями (ПТЛ), осуществляемый при приемке, подработке и отгрузке. Таким образом, объемы перемещаемого ПТЛ элеваторов зерна в целом на порядок превосходят объемы его производства. На Украине это десятки миллионов тонн зерна ежегодно. Это обуславливает актуальность задачи снижения времени и удельных энергозатрат на эти перемещения. В ПТЛ входят группы последовательно включенных конвейеров различных типов для горизонтального и вертикального (нории) перемещения зерна. В системах автоматического управления (САУ) ПТЛ, и в прошлом веке и сейчас, реализовывались только функции заблокированных пуска и останова конвейеров, контроля возникновения аварийных ситуаций и предотвращения перерастания их в аварию, в частности путем аварийного отключения ПТЛ. Функция управления загрузкой ПТЛ, в т.ч. – ее оптимизации по критерию максимальной производительности и энергоэффективности, из-за сложности их свойств как объекта управления (ОУ), всегда сохранялась за человеком-оператором, как и ответственность за результаты неэффективного управления. Эта сложность определяется наличием у объекта управления совокупности специфических особенностей. К ним относятся: ограничения типа «аварийная ситуация» на режимные переменные процесса транспортирования; априорная неизвестность значений этих границ; невозможность прямого измерения некоторых важных режимных переменных; существенные изменения динамических свойств ОУ по каналам управления при изменении маршрута транспортирования; а также, и это принципиально важно, то, что оптимальные режимы работы ПТЛ приближаются к аварийным. Очевидно, что обеспечить работу ПТЛ в таких режимах возможно только при создании эффективных САУ, учитывающих все особенности ОУ. В статье подробно рассматривается алгоритм управления САУ с коммутируемой структурой, который учитывает перечисленные особенности ОУ, и обеспечивает работу ПТЛ с максимально достижимой производительностью и энергоэффективностью при гарантированном предотвращении аварийных ситуаций и аварийных остановов ПТЛ. Алгоритм управления отлажен в ходе процедуры имитационного моделирования, а САУ с коммутируемой структурой прошла производственные испытания на элеваторе.