

ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ ТЕКУЩИХ ТРАЕКТОРИЙ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ МОДАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ В УСЛОВИЯХ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ¹

И. В. Чичерин, Б. А. Федосенков

*Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева,
Кемерово, Российская Федерация*

Определен объект управления в виде сигналов текущих траекторий (ТТ), по которым перемещаются беспилотные транспортные средства (БТС). Описана предметная область исследований – принцип и технология формирования сигналов, создаваемых автоматизированной системой для модального управления БТС при их передвижении по карьерным маршрутам. С целью выработки процедур идентификации предстоящей траектории БТС при объезде статических или динамических препятствий в программно-аппаратный комплекс заложены условия формирования соответствующего траекторного направления БТС на основе назначенных синусоидально подобных частотно-время-зависимых функций (чирп-сигналов), отвечающих за перенаправление БТС по той или иной траектории. Закреплены соответствующие чирп-сигналы для левой и правой девиационной траектории БТС. Введено понятие спорадических возмущений и принудительно-модальных переходных процессов (ПП). Рассмотрено также новое описание ПП, сигнал которого содержит варьруемую частоту, изменяющуюся по определенному закону в зависимости от направления и характера предстоящей девиации ТТ и окружающей БТС обстановки. Объясняются причины и сущность эффектов структурной и параметрической нестационарности объекта управления (ОУ). Представлены аналитическая и графическая интерпретации возникающей нестационарности, обусловленной введением в ОУ дополнительных полюсов стационарного и динамического типов. Отмечено, что стационарные полюсы характеризуют инерционность аperiodических компонент траекторных чирп-сигналов, а динамические определяют перманентно варьруемую частоту переходных процессов (их чирп-форму). Охарактеризованы свойства локализованных на комплексной плоскости полюсов как спорадических ПП, так и принудительно-модальных. Определены тарифовочные характеристики, устанавливающие связь между мгновенной частотой ПП и метрической девиацией ТТ БТС относительно номинальной осевой траектории. Функционально выделено и рассмотрено отличие между процедурами локализации и релокации полюсов для модальных восходящих и нисходящих обратных ПП, от которых зависит оперативность и безопасность перемещающихся по карьерным маршрутам БТС. Рассмотренные процедуры позволяют осуществлять online-мониторинг и эффективное управление динамикой оперативного и безопасного траекторного перемещения БТС по технологическим маршрутам карьера в условиях открытых горных работ.

Ключевые слова: беспилотные транспортные средства, текущие траектории, номинальная осевая траектория, чирп-сигнал, спорадические возмущения, принудительно-модальный процесс, вейвлет-карта, структурно-параметрическая нестационарность.

Для цитирования: Чичерин И. В., Федосенков Б. А. Формирование сигналов текущих траекторий в автоматизированной системе модального управления движением беспилотных транспортных средств в условиях открытых горных работ // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2021. № 4. С. 35–44. DOI: 10.24143/2072-9502-2021-4-35-44.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-11-20 19-034 от 22.11.2019 г. с ПАО «КАМАЗ» по комплексному проекту «Разработка и создание высокотехнологичного производства автономных тяжелых платформ для безлюдной добычи полезных ископаемых в системе «Умный карьер»», при участии ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» в части выполнения научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ.

Введение

В процессе управления траекторными сигналами, т. е. сигналами, с помощью которых создаются текущие траектории перемещения беспилотного транспортного средства (БТС), бортовая автоматизированная система управления [1] непрерывно формирует и подает управляющее воздействие на систему электромеханической части БТС, состоящей из рулевого механизма (исполняющего роль исполнительного механизма системы управления), электропривода ходовой части БТС (регулирующего органа системы) и ходового колесного механизма, приводя объект управления в виде сигналов текущей траектории (ТТ) к номинальному состоянию, т. е. к сигналу, соответствующему номинальной осевой траектории (НОТ). Таким образом, в системе управления возникают нестационарные процессы (режимы) траекторных сигналов, при обработке которых автоматизированной системой БТС формируются текущие траектории перемещения автосамосвала в процессе его «рыскания» или целенаправленного передвижения по определенным девиационным траекториям относительно НОТ.

С целью идентификации предстоящего формирования текущей девиационной траектории БТС при объезде какого-либо препятствия или при движении по искривленным маршрутам в программно-аппаратный комплекс системы заложены условия соответствия требуемого направления определенным одномерным синусоидальноподобным сигналам с время-зависимой частотой (чирп-сигналам) [1, 2]. Так, отклонению ТТ влево от НОТ ставится в соответствие чирп-сигнал с падающей по определенному закону время-зависимой частотой, а девиации ТТ вправо от НОТ – с возрастающей.

Характеристика нестационарности объекта управления

В процессе перемещения БТС по рабочему маршруту на пути автосамосвала могут возникать разного рода препятствия, которые бортовая система управления с помощью лидарно-радарно-сонарного устройства обнаруживает в зоне своей «видимости». Это могут быть препятствия как стационарного, так и динамического характера: временно установленные технические средства в виде осветительных опор, электротехнические распределительные устройства с воздушным или кабельным отведением, иные статические препятствия (негабаритные куски породы или полезного ископаемого), а также группы людей или встречные транспортные средства на проезжей части уступа. Поэтому необходимость возможности формирования для БТС девиационных ТТ системой управления обусловлена требованием преодолевать разного рода препятствия путем изменения ТТ перемещения БТС – ее отклонения от НОТ. При этом такие возникающие время от времени возмущения в составе траекторных сигналов уместно назвать спорадическими.

Формирование девиационной траектории БТС (ДТ БТС) производится за счет варьирования частоты траекторного сигнала (т. е. частоты чирп-сигнала, формирующего ДТ БТС) в переходном режиме, что, в конечном счете, приводит процесс начального отклонения ТТ БТС к новому установившемуся частотному режиму, который не соответствует сигналу, характеризующему НОТ. При этом девиация ТТ может происходить как влево от НОТ, так и вправо от нее. В связи с этим стабилизация чирп-сигнала для левой девиационной ТТ (ЛДТ) происходит на уменьшенной частоте, а правой (ПДТ) – на возросшей. Для реализации процедуры возврата ТТ к НОТ в том и другом случаях требуется воздействовать на внутреннюю структуру замкнутой системы автоматического управления так, чтобы изменить структурные и параметрические характеристики системы управления. Следовательно, для формирования начального и конечного участков полной ДТ БТС необходимо создать условия, с одной стороны, для реализации отклика на автономно-спорадическое возмущение, являющееся причиной возникновения начального участка ДТ БТС, с другой, для компенсации возникшего отклонения ДТ от линии НОТ средствами принудительно-модального управления при структурно-параметрической нестационарности за счет введения дополнительных полюсов и изменения стационарно-динамического размещения на комплексной плоскости всего облака полюсов системы [3, 4].

На рис. 1 отображены два варианта размещения полюсов объекта управления, характеризующие так называемые «обратные переходные процессы», которые соответствуют конечным участкам ДТ БТС восходящего и нисходящего типов при модальном управлении [3–5].

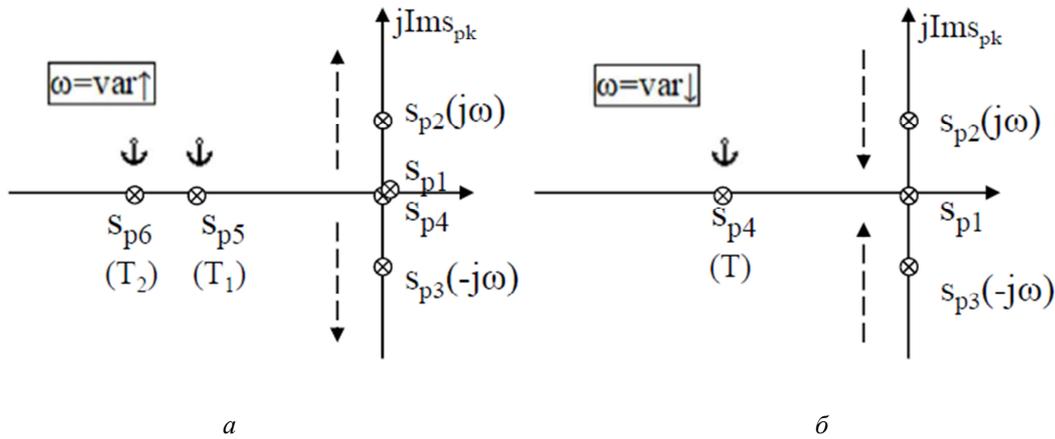


Рис. 1. Схематичное размещение закрепленных на комплексной плоскости вещественных полюсов S_{p4}, S_{p5}, S_{p6} , определяющих инерционность переходных процессов, и мнимых полюсов S_{p2}, S_{p3} с изменяющейся во времени локализацией, формирующих частотное изменение восходящего (а) и нисходящего (б) переходных процессов для конечных участков ЛДТ и ПДТ БТС соответственно

На рис. 1, а представлены статичные («якорные») полюсы S_{p4}, S_{p5} и S_{p6} , которые определяют инерционные свойства переходного процесса в виде аperiodической функции второго порядка [3]. Здесь мнимые полюсы S_{p2}, S_{p3} определяют характер сигнала с непрерывно варьируемой частотой, создающего конечный участок левой девиационной траектории (ЛДТ), в виде скалярного chirp-сигнала. На рис. 1, а для восходящего обратного переходного процесса (ВОПП) дополнительно возникающие полюсы S_{p5} и S_{p6} , соответствующие постоянным времени T_1 и $T_2 < T_1$, назначаются системой динамического модального управления *фиксированными* на комплексной плоскости. Эти полюсы создают двухэкспоненциальную аperiodическую компоненту траекторного сигнала конечного участка ЛДТ, компенсирующего девиацию ТТ от номинальной осевой и, как следствие, приводящего в итоге к перемещению БТС по НОТ.

Нулевой полюс S_{p4} соответствует ступенчатому воздействию, создающему аperiodический процесс для ТТ БТС, а полюс S_{p1} характеризует постоянную составляющую нецентрированного сигнала ТТ.

Chirp-характер переменной составляющей сигнала, формирующего конечный участок ЛДТ, определяется сопряженными полюсами S_{p2}, S_{p3} , непрерывно расходящимися по мнимой оси. При этом возрастает мгновенная частота chirp-сигнала, создавая ВОПП в системе, что, в свою очередь, инициирует формирование конечного участка ЛДТ, возвращая БТС к перемещению по НОТ.

На рис. 1, б полюс S_{p4} (инвариантный по времени процесса перемещения БТС), определяемый постоянной времени T , задает инерционность нисходящего одноэкспоненциального процесса по типу импульсной переходной характеристики аperiodики первого порядка [3]. Пара мнимых полюсов S_{p2}, S_{p3} сходится, формируя нисходящий по частоте chirp-сигнал, создающий конечный участок правой ДТ. Такой процесс изменения траекторного сигнала именуется нисходящим обратным переходным процессом (НОПП). В терминах перемещения БТС по маршруту это соответствует постепенному выходу БТС по ПДТ на НОТ.

Таким образом, при девиации ТТ вправо от НОТ, приводящей к повышению частоты траекторного сигнала, необходимо – с целью стабилизации режима движения БТС по осевой линии – снизить общий коэффициент передачи замкнутой системы, а также уменьшить значение мнимой сопряженной пары полюсов. Что касается обратного переходного процесса при start-стопном режиме перемещения БТС, то снижать значение мнимых полюсов следует только для наиболее мощных субгармоник первой гармоники Фурье-модели. Модель при этом имеет вид $B_1 \sin \omega_1 t + A_1 \cos \omega_1 t$. Режекция высших гармоник выполняется средствами низкочастотной фильтрации.

Отметим, что в базах данных структур набора полюсов объекта управления (ОУ), т. е. ТТ-сигналов, подсистем автономного и внешнего управления (ПСАУ и ПСВУ) содержатся следующие совокупности полюсов:

- для одного БТС при его девиации влево/вправо от НОТ при ВППП число полюсов возрастает с 2 до 5 (при центрированном ТТ-сигнале);
- для одного БТС при восстанавливающей НОТ ТТ (т. е. при НОПП) число полюсов увеличивается с 2 до 3.

В общем случае при $N_{\text{БТС}}$, находящихся на рабочих маршрутах, число полюсов для траекторных сигналов, с которым надлежит работать автоматизированной системе управления, вычисляется так:

- в режиме ВППП: $N_{p\uparrow} = N_{\text{БТС}} \cdot (2-5)$;
- в режиме НОПП: $N_{p\downarrow} = N_{\text{БТС}} \cdot (2-3)$.

Следовательно, с увеличением числа полюсов в составе ОУ в виде центрированного ТТ-сигнала в системе возникает эффект *структурной нестационарности*, поскольку меняется порядок изображения сигнала – порядок модели ОУ. При варьировании же значений пары мнимых сопряженных полюсов, приводящем к изменению частоты чирп-сигнала ТТ БТС, возникает эффект *параметрической нестационарности*.

Модальное управление текущими траекториями

С целью формирования ДТ БТС нами использован подход на основе ранее разработанной концепции управления процессами дозирования в условиях структурно-параметрической нестационарности [5].

При реализации ВОПП, отвечающего за формирование конечного участка левосторонней девиации ТТ на основе модального управления, восстановление номинального режима перемещения БТС производится по зависимости вида [3] $x(t)_{b/ei} = x(t)_{0b/ei} + x(t)_{mb/ei} \sin[2\pi f_{var}(t - \tau_b) - \varphi_0]$, где $f_{var} = f_b[1(t - \tau_b)] + (f_e - f_b) ([1(t - \tau_e)] - \exp[-(t - \tau_b) / T_3] T_3 / (T_3 - T_4) + \exp[-(t - \tau_b) / T_4] T_4 / (T_3 - T_4))$ – варьирование частоты восходящего чирп-сигнала (ВОПП); $x(t)_{mb/ei} = x_{mbi} + t/T$, $\tau_b \leq t \leq \tau_e$ – изменение амплитуды переменной компоненты ВОПП; $x(t)_{0b/ei} = x_{0bi} [1(t - \tau_b)] + (x_{0ei} - x_{0bi}) ([1(t - \tau_e)] - \exp[-(t - \tau_b) / T_3] T_3 / (T_3 - T_4) + \exp[-(t - \tau_b) / T_4] T_4 / (T_3 - T_4))$ – изменение аperiодической составляющей обратного переходного процесса; φ_0 – начальная фаза чирп-сигнала; t – текущее время; τ_b и τ_e – моменты начала и окончания переходного процесса соответственно.

Таким образом, полный график переходных процессов при двух циклах отклонения ТТ БТС влево/вправо от НОТ, включающий нисходящий прямой (НППП)/восходящий обратный (ВОПП) переходные процессы, а также восходящий прямой (ВППП) и нисходящий обратный (НОПП), имеет следующий вид (рис. 2).

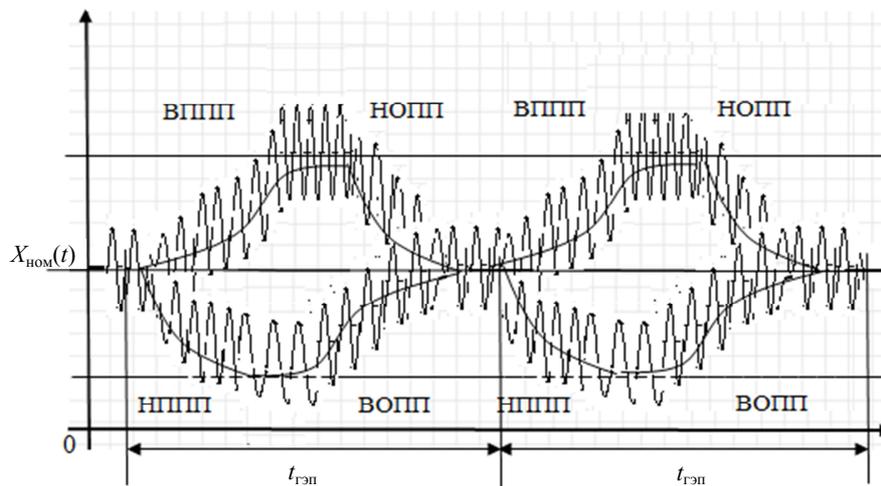


Рис. 2. Циклы управления процессом формирования возможных девиационных траекторий при поочередном объезде двух последовательно расположенных на пути следования БТС препятствий при перемещении БТС по начальному и конечному участкам ЛДТ (НППП – ВОПП) и ПДТ (ВППП – НОПП)

Ось ординат – ось сигнала $x(t)$, инициирующего формирование ДТ БТС.

На рис. 3 отдельно представлены выделенные из графиков рис. 2 осциллограммы ВОПП и НОПП (т. е. восстанавливающих НОТ), соответствующие конечным участкам левой и правой ДТ.



Рис. 3. Траекторные сигналы модального управления процессами формирования левой (ВОПП) и правой (НОПП) девиационных траекторий БТС

На рис. 2 схематично отображены четыре возможных варианта поочередного объезда двух последовательно расположенных препятствий на пути движения рассматриваемого БТС по различным девиационным траекториям (по левой – ЛДТ или правой – ПДТ): варианты представлены в виде чередующихся переходных процессов, генерируемых системой управления: вариант НППП – ВОПП соответствует объезду препятствия по ЛДТ (нижняя часть осциллограмм), вариант ВППП – НОПП – объезду по ПДТ (верхняя часть осциллограмм). Таким образом, возможные варианты объезда препятствий таковы: слева – слева, слева – справа, справа – справа, справа – слева. При этом сценарии объезда препятствий обусловлены характером их расположения на пути следования БТС, а также их геометрическими размерами. Интервал $t_{гэп}$ представляет собой время, спустя которое спорадически может возникнуть новое внешнее возмущение, откликом на которое является новая формируемая ДТ. Иными словами, это время формирования системой управления сигнала ДТ, по окончании которого восстанавливается движение БТС по НОТ.

На рис. 4, а и 5, а приведены два фрагмента структурной схемы модального управления нестационарным процессом формирования ДТ соответственно при ее правом и левом отклонениях от НОТ.

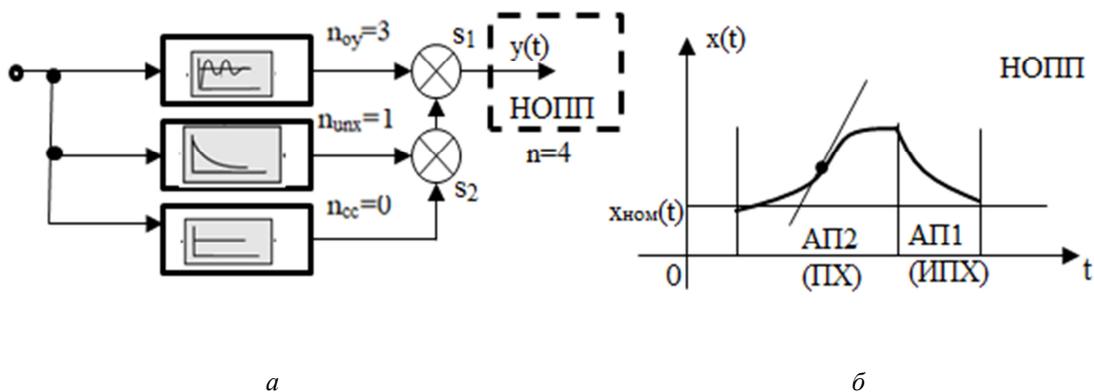


Рис. 4. Структурная схема модального управления нестационарным процессом формирования правой девиационной траектории (а) и график аperiodических компонент (б) переходного процесса для ПДТ в виде переходной характеристики (ПХ) второго порядка (ВППП) и обратного нисходящего (НОПП) в виде импульсной переходной характеристики (ИПХ) аperiodики первого порядка: n_{oy} – порядок объекта управления; $n_{ипх}$ – порядок ИПХ; $n_{сс}$ – порядок постоянной компоненты траекторного сигнала

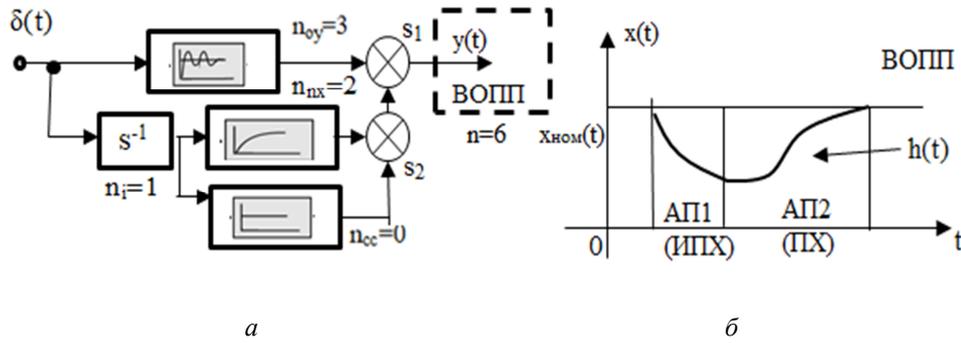


Рис. 5. Структурная схема модального управления нестационарным процессом формирования левой девиационной траектории (а) и график аperiодических компонент переходных процессов для ЛДТ в виде ИПХ аperiодики первого порядка (ИППП) и обратного восходящего (ВОПП) в виде ПХ аperiодики второго порядка (б): n_{nx} – порядок переходной характеристики; n_i – порядок интегрального звена

Кроме того, на рис. 4, б и 5, б представлены графики аperiодических компонент переходных процессов обратного нисходящего (НОПП) и обратного восходящего (ВОПП) типов соответственно. При этом НОПП реализуется в виде ИПХ аperiодики первого порядка, а ВОПП – в виде ПХ аperiодики второго порядка – $h(t)$.

На рис. 6 приведены в совмещенной форме структурная схема (а), графики локализации полюсов (б) объекта управления и аperiодических компонент (в) траекторного сигнала при левой ДТ, а также время-частотная вейвлет-карта [2, 6, 7] сигнала, формирующего конечный участок ЛДТ и соответствующего процессу ВОПП, где ω – варьируемая угловая частота chirп-сигнала дозирования; t_b и t_e – моменты начала и окончания принудительно-модального нестационарного процесса формирования ЛДТ БТС.

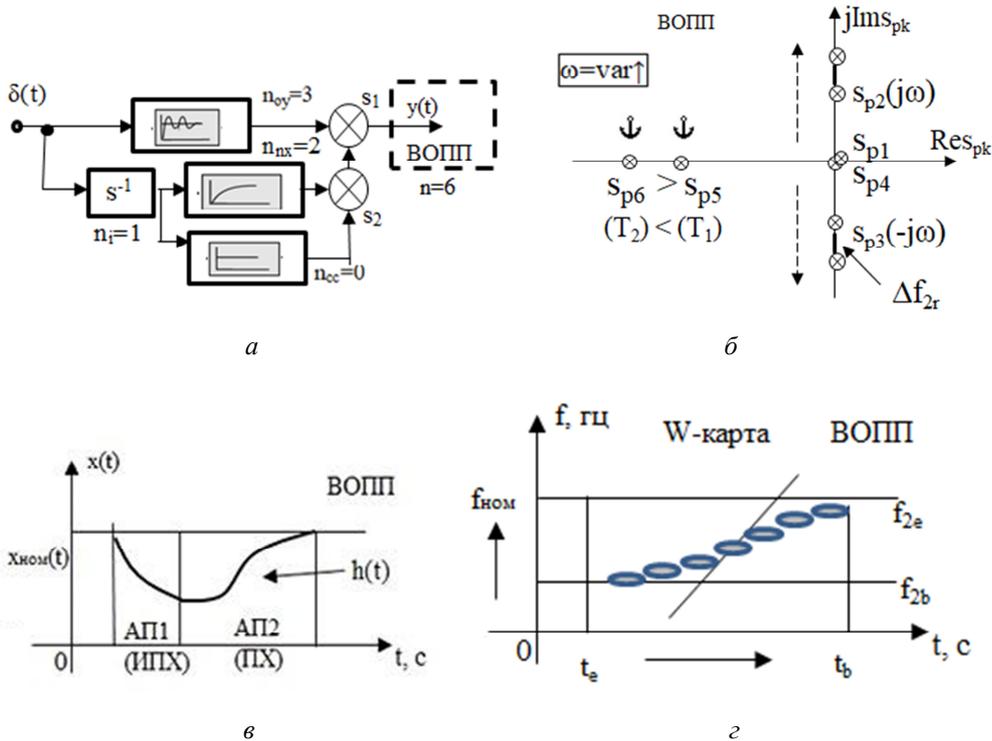


Рис. 6. Схемы, поясняющие структурно-параметрическую нестационарность объекта управления при модальном формировании левой девиационной ТТ БТС: а – фрагмент алгоритма модального управления процессом формирования ТТ в виде структурной схемы; б – схема принудительного варианта локализации фиксируемых полюсов s_{p4}, s_{p5}, s_{p6} , определяющих инерционность ПП, и непрерывно-варьируемой релокализации мнимых полюсов s_{p2}, s_{p3} , формирующих частотный характер ВОПП (его chirп-форму); в – изменение аperiодической составляющей сигнала нестационарного ПП формирования ТТ; г – вейвлет-карта chirп-сигнала ВОПП

На рис. 7 то же, но для НОПП, т. е. при формировании правой девиационной ТТ БТС.

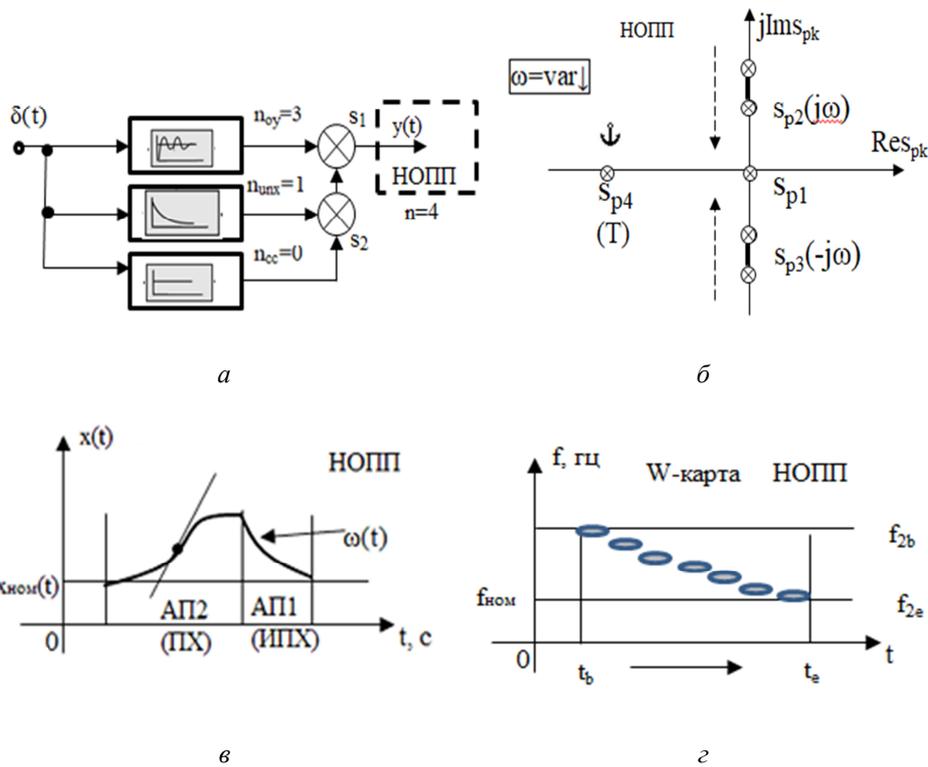


Рис. 7. Схемы, поясняющие структурно-параметрическую нестационарность объекта управления при модальном формировании правой девиационной траектории: *a* – фрагмент алгоритма модального управления процессом формирования ТТ в виде структурной схемы; *б* – схема принудительного варианта локализации полюса s_{p4} , определяющего инерционность ПП формирования текущей траектории, и непрерывно-варьируемой релокализации мнимых полюсов s_{p2} , s_{p3} , формирующих чирп-характер НОПП; *в* – изменение аperiodической составляющей нестационарного ПП формирования ТТ БТС; *г* – вейвлет-карта чирп-сигнала НОПП формирования ТТ БТС

В качестве вейвлет-карт на рис. 6 и 7 представлены так называемые квадратичные время-частотные распределения класса Коэна [6, 7] в виде распределений Вигнера – Вилле [2, 8, 9].

Отметим, что ВОПП (т. е. принудительно-модальный) при левой девиации ТТ принят в автоматизированной системе модального управления таким же по форме, что и ВППП при правой девиации ТТ БТС, с целью формирования процессов, восстанавливающих номинальный режим перемещения БТС, в естественном виде – с точки зрения функционирования составных элементов электромеханической части системы управления (рулевого механизма, электропривода ходовой части и ходового колесного механизма). При этом двухэкспоненциальную кривую, характеризующую конфигурацию ТТ БТС, следует рассматривать, с одной стороны, как зависимость метрического отклонения $d(t)$ БТС от НОТ, с другой стороны, – как функцию мгновенной частоты траекторного чирп-сигнала $f(t)$. На основе этой информации, используя графоаналитический подход, достаточно просто определить тарифовочные характеристики $d(f)$ – «метрическое отклонение девиационной траектории от номинальной осевой – мгновенная частота траекторного чирп-сигнала» текущих траекторий БТС двух типов:

- «мгновенная падающая частота траекторного чирп-сигнала – девиация ТТ БТС влево относительно НОТ»;
- «мгновенная возрастающая частота траекторного чирп-сигнала – девиация ТТ БТС вправо относительно НОТ».

Заметим, что для первой характеристики с левой девиационной ТТ изменение частоты f и девиации d происходит асинхронно (т. е. при падающей частоте девиация возрастает), а для второй характеристики с правым отклонением ТТ от НОТ – синхронно. По тарифовочным характеристикам, введенным в программно-аппаратный комплекс системы управления, последняя

по получаемым вейвлет-картам текущих траекторий БТС определяет мгновенную величину геометрического отклонения ТТ от НОТ, что позволяет на метрическом уровне контролировать ТТ перемещения БТС по карьерным маршрутам.

Заключение

В представленном исследовании описаны процедуры формирования и обработки сигналов программно-аппаратным комплексом автоматизированной системы управления текущими траекториями перемещения карьерных беспилотных транспортных средств. Рассмотренные процедуры позволяют осуществлять online-мониторинг и эффективное управление динамикой оперативного и безопасного траекторного перемещения БТС по технологическим маршрутам карьера в условиях открытых горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чичерин И. В., Федосенков Б. А., Сыркин И. С., Садовец В. Ю., Дубинкин Д. М. Концепция управления беспилотными транспортными средствами в условиях открытых горных работ // Изв. вузов. Горный журнал. 2020. № 8. С. 109–121.
2. Mallat S. A wavelet tour of signal processing. New York: Academic Press (2nd Ed.), Ecole Polytechnique, Paris; Courant Institute, New York University, Library of Congress Catalog Card Number: 99-65087, 1999; Reprinted 2001. 637 p.
3. Федосенков Б. А. Теория автоматического управления. Классические и современные разделы: учеб. пособие. Кемерово: Изд-во КемГУ, 2018. 322 с.
4. Гудвин Г. К., Гребен С. Ф., Сальгадо М. Э. Проектирование систем управления. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. 911 с.
5. Симилова А. А., Федосенков Б. А., Федосенков Д. Б. Модальное управление процессами дозирования в среде пространства состояний и вейвлет-преобразований // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2019. № 4. С. 46–58.
6. Auger F., Chassande-Mottin E. Quadratic time-frequency analysis I: Cohen's class, Time-frequency analysis: concepts and methods // ISTE. 2008. January. P. 131–163.
7. Fedosenkov D. B., Simikova A. A., Kulakov S. M., Fedosenkov B. A. Cohen's class time-frequency distributions for measurement signals as a means of monitoring technological processes // Steel in Translation. 2019. V. 49. N. 4. P. 252–256.
8. Федосенков Б. А., Федосенков Д. Б. Автоматизированное управление технологическими процессами в вейвлет-среде: моногр. Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2021. 161 с.
9. Debnath L. Recent development in the Wigner-Ville distribution and time-frequency signal analysis // Proceedings of the Indian National Science Academy (PINSAs), January 2002. 68A:1. P. 35–56. DOI:10.1007/978-0-8176-8418-1_5.

Статья поступила в редакцию 05.07.2021

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иван Владимирович Чичерин — канд. техн. наук, доцент; зав. кафедрой информационных и автоматизированных производственных систем; Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева; Россия, 650000, Кемерово; chicivan@yandex.ru.

Борис Андреевич Федосенков — д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры информационных и автоматизированных производственных систем; Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева; Россия, 650000, Кемерово; rafwaveletsve@mail.ru.



FORMING SIGNALS OF CURRENT TRAJECTORIES IN COMPUTER-AIDED SYSTEM OF MODAL CONTROLLING UNMANNED VEHICLES IN OPEN PIT MINING

I. V. Chicherin, B. A. Fedosenkov

*T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
Kemerovo, Russian Federation*

Abstract. The article defines the object of control in the form of signals of current trajectories (CT), along which unmanned vehicles (UMV) move. It describes the subject field of research – the principle and technology of forming the signals generated by the computer-aided system for modal controlling the UMVs during their movement along quarry routes. In order to develop procedures for identifying an upcoming trajectory of the UMV when bypassing some static or dynamic obstacles, conditions are included in the software and hardware complex for the formation of the UMV corresponding trajectory direction based on assigned sinusoidal-like frequency-time-dependent functions (chirp signals) responsible for redirecting the UMV along a particular trajectory. The corresponding chirp signals for the left and right deviation trajectories of the UMV are fixed. The notion of sporadic disturbances and force-modal transient processes (TP) is introduced. There has been also reviewed a new description of TP, whose signal contains the variable frequency changing by a certain law depending on the direction and nature of a CT deviation and the environment of UMV. The essence and reasons for the effects of structural and parametric nonstationarity of the control object (CO) are explained. Analytical and graphical interpretations of the emerging nonstationarity caused by the introduction of additional stationary and dynamic-type poles into the CO are presented. It is noted that the stationary poles characterize the inertia of the aperiodic components of the trajectory chirp signals, and the dynamic ones determine the permanently varied frequency of transients (their chirp form). The properties of both sporadic and forced-modal TP's poles localized on the complex plane are characterized. Calibration characteristics are determined that establish a relationship between the instantaneous frequency of TP and the metric deviation of UMV CT relative to the nominal axial trajectory. The difference between the procedures of localization and re-localization of poles for modal upward and downward reverse TP, on which the efficiency and safety of UMV moving along the quarry routes, depends, is functionally identified and considered. All the procedures mentioned above make it possible to monitor online and control effectively the dynamics of operative and safe UMV trajectory moving along technological quarry routes in open pit mining.

Key words: unmanned vehicles, current trajectories, nominal axial trajectory, chirp signal, sporadic disturbances, forced-modal process, wavelet map, structural-parametric nonstationarity.

For citation: Chicherin I. V., Fedosenkov B. A. Forming signals of current trajectories in computer-aided system of modal controlling unmanned vehicles in open pit mining. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2021;4:35-44. (In Russ.) DOI: 10.24143/2072-9502-2021-4-35-44.

REFERENCES

1. Chicherin I. V., Fedosenkov B. A., Syrkin I. S., Sadovets V. Iu., Dubinkin D. M. Kontseptsiiia upravleniia bespilotnymi transportnymi sredstvami v usloviakh otkrytykh gornykh rabot [Concept of control of unmanned vehicles in open mining]. *Izvestiia vuzov. Gornyi zhurnal*, 2020, no. 8, pp. 109-121.
2. Mallat S. A wavelet tour of signal processing. New York, Academic Press (2nd Ed.), Ecole Polytechnique, Paris; Courant Institute, New York University, Library of Congress Catalog Card Number: 99-65087, 1999; Reprinted 2001. 637 p.
3. Fedosenkov B. A. *Teoriia avtomaticheskogo upravleniia. Klassicheskie i sovremennye razdely: uchebnoe posobie* [Theory of automatic control. Classic and modern sections: study guide]. Kemerovo, Izd-vo KemGU, 2018. 322 p.
4. Gudvin G. K., Grebe S. F., Sal'gado M. E. *Proektirovanie sistem upravleniia* [Design of control systems]. Moscow, BINOM. Laboratoriia znaniy Publ., 2004. 911 p.
5. Simikova A. A., Fedosenkov B. A., Fedosenkov D. B. Modal'noe upravlenie protsessami dozirovaniia v srede prostranstva sostoianii i veivlet-preobrazovanii [Modal control of dosing processes in state space and wavelet transformations environment]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naia tekhnika i informatika*, 2019, no. 4, pp. 46-58.

6. Auger F., Chassande-Mottin E. Quadratic time-frequency analysis I: Cohen's class, Time-frequency analysis: concepts and methods. *ISTE*, 2008, January, pp. 131-163.

7. Fedosenkov D. B., Simikova A. A., Kulakov S. M., Fedosenkov B. A. Cohen's class time-frequency distributions for measurement signals as a means of monitoring technological processes. *Steel in Translation*, 2019, vol. 49, no. 4, pp. 252-256.

8. Fedosenkov B. A., Fedosenkov D. B. *Avtomatizirovannoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami v veivlet-srede: monografiia* [Computer-aided controlling the technological processes in a wavelet medium: monograph]. Kemerovo, Izd-vo KuzGTU, 2021. 161 p.

9. Debnath L. Recent development in the Wigner-Ville distribution and time-frequency signal analysis. *Proceedings of the Indian National Science Academy (PINS)*, January 2002. 68A:1. Pp. 35-56. DOI: 10.1007/978-0-8176-8418-1_5.

The article submitted to the editors 05.07.2021

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivan V. Chicherin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; Head of the Department of Information and Computer-Aided Manufacturing Systems; T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University; Russia, 650000, Kemerovo; chicivan@yandex.ru.

Boris A. Fedosenkov – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Information and Computer-Aided Manufacturing Systems; T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University; Russia, 650000, Kemerovo; rafwaveletsve@mail.ru.

