

- prakticheskoy konferentsii «Predotvrashchenie. Spasenie. Pomoshch'», 21 marta 2019 g. [The use of robotic systems for special purposes: Proceedings of section No. 5 of the XXIX International scientific and practical conference "Prevention. The rescue. Help", March 21, 2019]. FGBVOU VO AGZ EMERCOM of Russia, 2019, pp. 103-111.
22. Formulyar 006-TIPSA-2010. Rukava pozhamye napornye OROFLEX20 [Form 006-TIPSA-2010. Pressure fire hoses OROFLEX20]. Balashikha: FGU VNIPO MCHS Rossii, 2010, 11 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. С.С. Носков.

Баранник Александр Юрьевич – Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, федеральный центр науки и высоких технологий; e-mail: auba@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89166951214; к.т.н.; с.н.с.; ведущий научный сотрудник 6 научно-исследовательского центра «Развития технических средств и технологий».

Лагутина Анна Викторовна – e-mail: anya-lagutina@yandex.ru; тел.: 89057118834; старший научный сотрудник 6 научно-исследовательского центра «Развития технических средств и технологий».

Павлов Евгений Владимирович – ФГБУ «Всероссийский ордена «Знак Почёта» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России»; e-mail: pavlov-vp@mail.ru; г. Балашиха, Россия; тел.: 89167850002; старший научный сотрудник научно-исследовательского центра пожарной техники и пожарной автоматики.

Ершов Владимир Иванович – e-mail: evi-monino@mail.ru; тел.: 89690301515; к.в.н.; профессор; ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра пожарной техники и пожарной автоматики.

Barannik Alexander Yuryevich – All-Russian Scientific Research Institute for Civil Defense and Emergency of the EMERCOM of Russia, Federal Science and High Technologies Center; e-mail: auba@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79166951214; cand. of eng. sc.; senior researcher; leading researcher of the 6th Research Center Development of technical means and technologies.

Lagutina Anna Viktorovna – e-mail: anya-lagutina@yandex.ru; phone: +79057118834; senior researcher of the 6th Research Center Development of technical means and technologies.

Pavlov Evgeny Vladimirovich – Federal State Budgetary Institution "All-Russian Order" Badge of Honor "Research Institute of Fire Defense of the Ministry of Emergency Situations of Russia", e-mail: pavlov-vp@mail.ru; Balashikha, Russia; phone: +79167850002; senior researcher at the Research Center for Fire Engineering and Fire Automation.

Ershov Vladimir Ivanovich – e-mail: evi-monino@mail.ru; phone: +79690301515; cand. of mil. sc.; sprofessor; leading researcher of the Research Center for Fire Engineering and Fire Automation.

УДК 681.5

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-88-100

Е.Ю. Пушкарёва, И.В. Пискулин

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РТК ВН В РЕЖИМЕ АВТОНОМНОГО НАВЕДЕНИЯ

Целью исследования является повышение точности системы управления движением наземных робототехнических комплексов военного назначения (РТК ВН) гусеничного типа на основе применения метода построения двухконтурных систем автоматического управления, эквивалентных комбинированным системам. Использование систем автоматического управления, эквивалентных комбинированным системам позволяет добиться повышения точности систем автоматического управления за счет уменьшения значения динамической ошибки, то есть достижение инвариантности ошибки, без нарушения устойчивости системы. Задачей исследования явля-

ется возможность достижения нулевой ошибки в одноконтурных и двухконтурных системах автоматического управления движением РТК. Для решения данной задачи необходимо определить структуру САУ и составить структурные схемы систем автоматического управления движением РТК ВН по углу курса. Данная задача может быть решена поэтапно. В ходе первого этапа рассматривается связь ошибок управления в одноконтурных системах автоматического управления с постоянным входным воздействием. Следующим этапом является обоснование построения двухконтурных систем с учетом линейного входного воздействия. Далее необходимо определить параметры второго контура двухконтурной САУ движением РТК. В задаче рассматривается связь динамической ошибки управления в двухконтурных САУ движением РТК по углу курса с линейным входным воздействием. Используемый в статье метод позволяет решать задачу достижения инвариантности ошибки в САУ движением РТК ВН по углу курса. В работе приведена методика определения параметров и структуры САУ в целях достижения нулевой ошибки, что, в свою очередь, приводит к повышению точности при соблюдении требования к устойчивости системы. Результаты расчетов подтверждают работоспособность предложенной методики и показывают, что при различных вариантах входных воздействий (постоянном и линейном) в одноконтурных и двухконтурных САУ движением РТК по курсу удается достичь независимости уменьшения динамической ошибки от устойчивости САУ (т.е. достижения инвариантности ошибки без потери устойчивости системы).

Робототехнический комплекс; система управления движением; угол курса; метод двухконтурных систем; инвариантность; структурная схема.

E.Y. Pushkareva, I.V. Piskulin

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF THE TRACKING SYSTEM OF THE RTK VN MOTION CONTROL IN THE AUTONOMOUS GUIDANCE MODE

The aim of the study is to improve the accuracy of the motion control system of ground-based robotic systems for military purposes (RTK VN) of tracked type based on the application of the method of constructing two-circuit automatic control systems equivalent to combined systems. The use of automatic control systems equivalent to combined systems makes it possible to increase the accuracy of automatic control systems by reducing the value of the dynamic error, that is, achieving error invariance, without violating the stability of the system. The objective of the study is the possibility of achieving zero error in single-circuit and double-circuit automatic motion control systems RTK. To solve this problem, it is necessary to determine the structure of the ACS and draw up block diagrams of automatic traffic control systems of the RTK VN along the angle of the course. This task can be solved in stages. During the first stage, the connection of control errors in single-circuit automatic control systems with a constant input effect is considered. The next stage is the justification of the construction of two-circuit systems taking into account the linear input effect. Next, it is necessary to determine the parameters of the second circuit of the two-circuit ACS by the movement of the RTK. The problem considers the relationship of the dynamic control error in dual-circuit ACS by the movement of the RTK along the angle of the course with the linear input effect. The method used in the article allows us to solve the problem of achieving the invariance of the error in the ACS by the movement of the RTK VN along the angle of the course. The paper presents a methodology for determining the parameters and structure of the ACS in order to achieve zero error, which, in turn, leads to increased accuracy while meeting the requirements for the stability of the system. The calculation results confirm the operability of the proposed methodology and show that with various input effects (constant and linear) in single-circuit and double-circuit ACS, the RTK movement along the course can achieve independence of reducing the dynamic error from the stability of the ACS (i.e., achieving error invariance without loss of stability of the system).

Robotics complex; motion control system; course angle; method of two-circuit systems; invariance; block diagram.

Введение. Под робототехническими комплексами военного назначения (РТК ВН) будем понимать совокупность функционально взаимосвязанных элементов: базового носителя (изделия военной робототехники), специализированного навесного (встраиваемого) оборудования, представленного в виде набора съемных мо-

дулей полезной (целевой) нагрузки, а также средств обеспечения и обслуживания, используемых при подготовке к применению и дальнейшей технической эксплуатации комплекса [17–20].

Основными областями применения РТК ВН в интересах ракетных войск стратегического назначения (РВСН) являются:

- ◆ разведка и наблюдение позиционных районов (поиск, обнаружение и слежение за силами и средствами противника);
- ◆ патрулирование на заданных рубежах и боевое охранение;
- ◆ охрана пунктов управления, противовоздушная и противоракетная оборона;

На этапе несения боевого дежурства РТК ВН в составе ракетных комплексов стратегического назначения (РКСН) [17, 18] могут быть разделены на две группы:

- ◆ боевые – используемые, в основном, для проведения разведки позиционных районов и охраны пунктов управления ракетных соединений;
- ◆ обеспечивающие – специальные и транспортные РТК для решения задач поддержки.

Боевой РТК в ходе выполнения охранных функций элементов РВСН должен осуществлять обнаружение, а затем слежение за целью в режиме автономного наведения. Выполнение указанной задачи должно осуществляться в процессе сближения РТК с объектом наблюдения, т.е. уменьшения дальности до цели, что, в свою очередь, может улучшить качество наблюдения, усилить сигнал, увеличить линейное разрешение объекта. В связи с вышесказанным, задача управления движением РТК ВН и увеличения его подвижности становится все более востребованной [2–9].

Учитывая тот факт, что элементы РВСН могут находиться в труднодоступных для движения РТК рельефах местности (лесистая местность, неровности поверхности и др.) для исследования управляемого движения робота выбран РТК гусеничного типа, так как он способен преодолевать большие препятствия и имеет значительную площадь контакта с поверхностью перемещения [3, 4]. Использование РТК гусеничного типа приводит к необходимости применения метода управления углом курса РТК по разности скоростей [5, 7–9]. Исходя из изложенного, следует, что в данной работе объектом исследования является система автоматического управления (САУ) углом курса РТК, работающая по методу разности скоростей.

Задачам повышения точности без нарушения устойчивости систем автоматического управления посвящено значительное количество работ [9–16]. Лучше всего подобные задачи решаются в классе комбинированных систем автоматического управления, работающих по отклонению и задающему воздействию [10, 11].

В условиях, если внешние воздействия (задающие и возмущающие) не измеряемы, следует использовать теорию САУ, которые являются эквивалентными комбинированным автоматическим системам.

Для повышения точности автоматических систем управления, применяемых в системах управления движением РТК, необходимо обратиться к теории инвариантности [11–13]. Данная теория позволяет обосновать выбор структуры САУ, применяемых для управления движением РТК.

Формальная постановка задачи. В целях исследования точности систем автоматического управления движением РТК ВН по курсу необходимо выяснить связь ошибки воспроизведения угла курса от входного воздействия. В ходе исследования необходимо определить возможность достижения нулевой ошибки в одноконтурных и двухконтурных системах автоматического управления движением РТК.

Решение сформулированной выше задачи предлагается осуществлять в три этапа. На первом этапе необходимо определить структуру САУ и составить структурные схемы систем автоматического управления движением РТК ВН по углу курса.

На втором этапе необходимо определить связь ошибок управления в одно-контурных системах автоматического управления движением РТК с постоянным входным воздействием.

На третьем этапе необходимо определить параметры второго контура двухконтурной САУ движением РТК, определить связь динамической ошибки управления с линейным входным воздействием.

Исходя из того, что в системах, эквивалентных комбинированным, задающее воздействие непосредственно неизмеряемо, а само управление формируется в зависимости от сигнала идентификационного устройства, можно выделить два случая функционирования САУ движением РТК ВН:

- ♦ цель неподвижна, скорость ее перемещения равна нулю, рис. 1;
- ♦ цель подвижна, ее скорость не равна нулю, рис. 2.

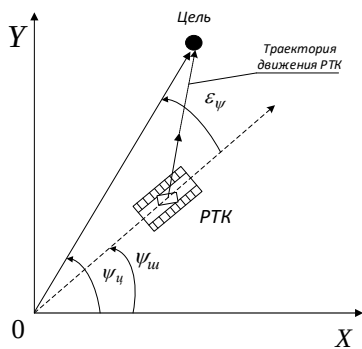


Рис. 1. К иллюстрации траектории движения РТК при постоянном входном воздействии на следящую систему по углу курса ψ_u ($\psi_u = \text{const}$)

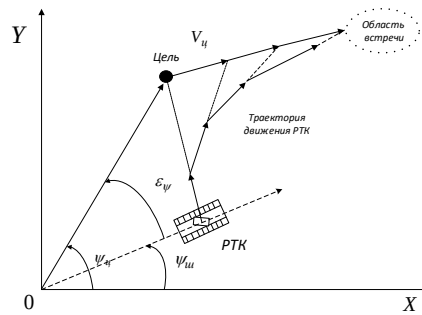


Рис. 2. К иллюстрации траектории движения РТК при линейном входном воздействии на следящую систему по углу курса ψ_u ($\psi_u \neq \text{const}$)

На рис. 1 и 2 линия ОХ является осью отсчета угловых величин.

Структурная схема одноконтурной САУ движением РТК ВН. РТК при выполнении охранных функций может выполнять задачи обнаружения и распознавания целей в автоматическом режиме [2, 3, 17, 18]. Более простым способом управления движением РТК является случай, при котором скорость перемещения цели равна нулю (цель неподвижна). В этом случае угол курса является величиной постоянной ($\psi_u = \text{const}$).

Структурная схема САУ движением РТК по углу курса в случае, при котором можно добиться нулевой ошибки, представлена в виде одноконтурной системы на рис. 3.

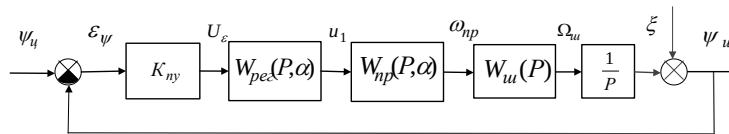


Рис. 3. Структурная схема одноконтурной САУ движением РТК по курсу

На указанной схеме ψ_u – угол курса цели относительно оси отсчета; ε_{ψ} – ошибка воспроизведения угла курса; U_{ε} – сигнал от измерительного устройства; u_1 – управление по ошибке; ω_{np} – угловая скорость вала привода;

$\Omega_{\text{ш}}$ – угловая скорость поворота шасси; ξ – воздействие от возмущения; $\psi_{\text{ш}}$ – угол курса движения РТК; $W_{\text{pezl}}(P, \alpha)$, $W_{\text{np}}(P, \alpha)$, $W_{\text{ш}}(P)$ – передаточные функции регулятора, привода, шасси РТК, α – коэффициент подвижности РТК при управлении по методу разности скоростей [5–8].

Передаточные функции регулятора, привода, шасси определяются в соответствии с [1] следующими выражениями:

$$W_{\text{pezl}}(P, \alpha) = K_{\text{pez}}K(\alpha); W_{\text{np}}(P, \alpha) = \frac{K_{\text{э}}K_{\text{д}}W(\alpha)}{(1 + T_{\text{э}}P)(1 + T_{\text{д}}P)}; W_{\text{ш}}(P) = \frac{K_{\text{ш}}}{1 + T_{\text{ш}}P}, \quad (1)$$

$$K(\alpha) = \frac{1}{\alpha - 1}, \alpha > 1, W(\alpha) = \alpha - 1, \alpha > 1,$$

где $K_{\text{э}}, K_{\text{д}}, K_{\text{ш}}$ – коэффициенты усиления электромашинного усилителя, электродвигателя и шасси соответственно; $T_{\text{э}}, T_{\text{д}}, T_{\text{ш}}$ – их постоянные времени.

Следует заметить, что определение коэффициента $K(\alpha)$ регулятора было синтезировано из условия минимума функции чувствительности как отношение относительного изменения передаточной функции замкнутой САУ к относительному изменению параметра α [5].

Передаточная функция разомкнутой системы с переменными параметрами будет определяться следующим образом:

$$W_p(P, \alpha) = \frac{K_{\text{ny}}K_{\text{pez}}K_{\text{э}}K_{\text{д}}K_{\text{ш}}K(\alpha)W(\alpha)}{(1 + T_{\text{э}}P)(1 + T_{\text{д}}P)(1 + T_{\text{ш}}P)P}, \quad (2)$$

$K_{\text{v}} = K_{\text{ny}}K_{\text{pez}}K_{\text{э}}K_{\text{д}}K_{\text{ш}}$ – коэффициент усиления по скорости.

Передаточная функция по ошибке одноконтурной САУ с учетом выражений (1), (2) и $K(\alpha)W(\alpha) = 1$ определяется следующим образом:

$$W_{\varepsilon}(P) = \frac{1}{1 + W_p(P)} = \frac{(1 + T_{\text{э}}P)(1 + T_{\text{д}}P)(1 + T_{\text{ш}}P)P}{(1 + T_{\text{э}}P)(1 + T_{\text{д}}P)(1 + T_{\text{ш}}P)P + K_{\text{v}}} =$$

$$= \frac{T_{\text{э}}T_{\text{д}}T_{\text{ш}}P^4 + T_{\text{э}}T_{\text{д}}P^3 + T_{\text{д}}T_{\text{ш}}P^3 + T_{\text{э}}T_{\text{ш}}P^3 + T_{\text{э}}P^2 + T_{\text{д}}P^2 + T_{\text{ш}}P^2 + P}{T_{\text{э}}T_{\text{д}}T_{\text{ш}}P^4 + T_{\text{э}}T_{\text{д}}P^3 + T_{\text{д}}T_{\text{ш}}P^3 + T_{\text{э}}T_{\text{ш}}P^3 + T_{\text{э}}P^2 + T_{\text{д}}P^2 + T_{\text{ш}}P^2 + P + K_{\text{v}}} \quad (3)$$

В соответствии с [1], а также с учетом заданных воздействий, выражение для установившихся ошибок (т.е. $t \rightarrow \infty, P \rightarrow 0$) примет вид:

$$\varepsilon_{\psi} = D_0\psi_{\text{ш}} + D_1\frac{d\psi_{\text{ш}}}{dt}, \quad (4)$$

где $D_0 = W_{\varepsilon}(P) \big|_{P=0}$ – коэффициент ошибки по положению;

$D_1 = \frac{dW_{\varepsilon}(P)}{dP} \big|_{P=0}$ – коэффициент ошибки по скорости.

Исходя из того, что угол курса является величиной постоянной ($\psi_{\text{ш}} = \text{const}$), установившаяся ошибка будет равна только ошибке по положению ε_0 . Выражение для определения ошибки примет вид:

$$\varepsilon_0 = D_0\psi_{\text{ш}}. \quad (6)$$

В соответствии с схемой рис. 3 одноконтурная САУ имеет интегрирующее звено (порядок астатизма системы V равен единице). Поэтому в САУ с астатизмом первого порядка коэффициент ошибки по положению равен нулю ($D_0 = 0$). Следовательно, ошибка по положению будет равна нулю:

$$\varepsilon_0 = D_0 \psi_y = 0. \quad (7)$$

Исходя из вышесказанного и выражения (7), следует, что в одноконтурной САУ движением РТК ВН по курсу, структура которой представлена на рис. 3, можно добиться нулевой ошибки воспроизведения угла курса только при постоянном входном воздействии.

Структурная схема двухконтурной САУ движением РТК ВН, эквивалентная комбинированной системе. РТК в режиме слежения может выполнять задачу по обнаружению двигающейся цели [3, 4]. При указанных условиях скорость передвижения цели не равна нулю (цель перемещается), соответственно угол курса изменяется с течением времени $\psi_y(t) = \psi_0 + \dot{\psi}_y(t)$, что в свою очередь затрудняет задачу управления движением РТК ВН в соответствии с структурной схемой, представленной на рис. 3.

Добиться выполнения условия получения нулевой ошибки по скорости возможно повышением порядка астатизма системы до второго порядка ($\nu=2$), если поставить еще один интегратор в разомкнутый канал схемы рис. 3. В данном случае возникают проблемы с обеспечением устойчивости замкнутой системы, что следует из построения амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой системы.

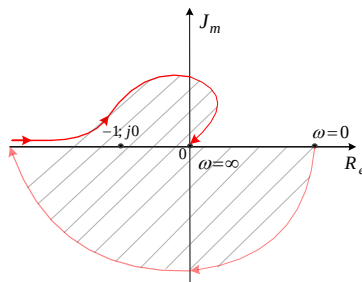


Рис. 4. К иллюстрации неустойчивости замкнутой САУ движением РТК по курсу при втором порядке астатизма

Увеличение астатизма на единицу в схеме системы управления (т.е. включение в разомкнутый канал еще одного интегрирующего звена) может привести к ее неустойчивости, выйти из которой путем изменения параметров $K_{ny}K_{pez}K_{\theta}K_{\phi}K_{\mu}$ не представляется возможным.

Включение в разомкнутый канал управления форсирующих контуров не снимет проблему устойчивости в ситуациях наличия на входе следящей системы угловых случайных процессов (помех).

Повышение порядка астатизма, приводящего к выполнению требования нулевой скоростной ошибки без нарушения устойчивости замкнутого контура, можно добиться в регуляторе второго контура двухконтурной системы, эквивалентной комбинированной автоматической системе [9–11].

Таким образом, наличие во втором контуре регулятора приводит к повышению порядка астатизма на единицу без влияния на устойчивость одноконтурной САУ.

Структурная схема двухконтурной САУ, эквивалентной комбинированной системе, может быть построена двумя способами:

- ♦ без охвата регулятора второго контура обратной связью;
- ♦ с охватом регулятора положительной обратной связью.

Вариант 1. Построение двухконтурной САУ, эквивалентной комбинированной системе, применительно к САУ рис. 3.

Структурная схема примет вид, представленный на рис. 5.

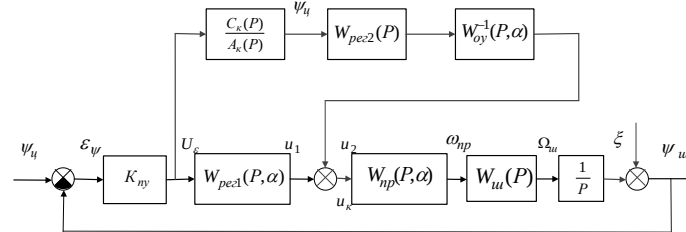


Рис. 5. Структурная схема двухконтурной САУ, эквивалентная комбинированной без охвата регулятора обратной связью

На данной схеме K_{ny} – коэффициент преобразования измерительного устройства; ξ – воздействие от возмущения.

Определение полиномов $\frac{C_k(P)}{A_k(P)}$ осуществляется в соответствии с [5] по следующим выражениям:

$$\begin{aligned} C_k(P) &= C_1(P)C_{pec2}(P), \\ A_k(P) &= A_1(P)[C_{pec2}(P) - B_{pec2}(P)P^{-1}] \end{aligned} \quad (8)$$

Остановимся более подробно на структурной схеме с охватом регулятора второго контура положительной обратной связью. Построение схемы является практически аналогичным, за исключением структуры первого блока второго контура.

Вариант 2. Построение двухконтурной САУ, эквивалентной комбинированной системе, в которой предусматривается охват регулятора 2 положительной обратной связью, соответствующая схема представлена на рис. 6.

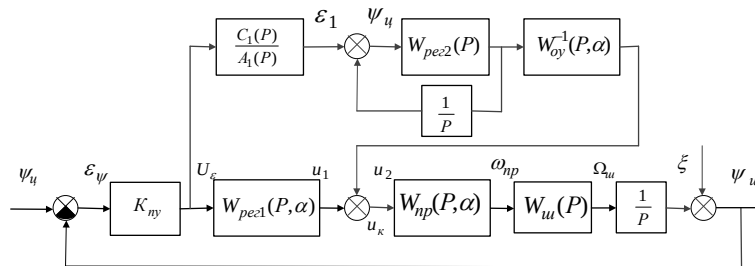


Рис. 6. Структурная схема двухконтурной САУ, эквивалентная комбинированной с замкнутым регулятором второго контура

На указанной схеме: ε_ψ – ошибка воспроизведения угла курса; U_ε – сигнал от измерительного устройства; u_1, u_2, u_k – управление от первого контура, управление от второго контура, комбинированное управление соответственно. Блок с ПФ $W_{oy}^{-1}(P, \alpha)$ осуществляет инверсию ПФ $W_{oy}(P)$.

Передаточные функции регулятора 1, привода, шасси определяются следующими выражениями:

$$W_{pez1}(P) = K_{pez}K(\alpha); W_{np}(P) = \frac{K_3K_\delta W(\alpha)}{(1+T_3P)(1+T_\delta P)}; W_{ш}(P) = \frac{K_{ш}}{1+T_{ш}P}, \quad (9)$$

где $K_3, K_\delta, K_{ш}$ – коэффициенты усиления электромашинного усилителя, электродвигателя и шасси соответственно; $T_3, T_\delta, T_{ш}$ – их постоянные времени.

Передаточная функция разомкнутой системы будет иметь вид:

$$W_p(P) = \frac{K_{ny}K_{pez}K_3K_\delta K_{ш}}{(1+T_3P)(1+T_\delta P)(1+T_{ш}P)P}. \quad (10)$$

$K_v = K_{ny}K_{pez}K_3K_\delta K_{ш}$ – коэффициент усиления.

Передаточная функция по ошибке первого контура САУ с учетом выражений определяется выражением:

$$W_\varepsilon^{(1)}(P) = \frac{(1+T_3P)(1+T_\delta P)(1+T_{ш}P)P}{(1+T_3P)(1+T_\delta P)(1+T_{ш}P)P + K_v} =$$

$$= \frac{T_3T_\delta T_{ш}P^4 + (T_3T_\delta + T_\delta T_{ш} + T_3T_{ш})P^3 + (T_3 + T_\delta + T_{ш})P^2 + P}{T_3T_\delta T_{ш}P^4 + (T_3T_\delta + T_\delta T_{ш} + T_3T_{ш})P^3 + (T_3 + T_\delta + T_{ш})P^2 + P + K_v} \quad (11)$$

Из схемы рис. 6 видно, что блок с передаточной функции $\frac{C_1(P)}{A_1(P)}$ является обратным по отношению к блоку с передаточной функцией $W_\varepsilon^{(1)}(P) = \frac{A_1(P)}{C_1(P)}$, где:

$$\left. \begin{aligned} C_1(P) &= T_3T_\delta T_{ш}P^4 + (T_3T_\delta + T_\delta T_{ш} + T_3T_{ш})P^3 + (T_3 + T_\delta + T_{ш})P^2 + P + K_v; \\ A_1(P) &= T_3T_\delta T_{ш}P^4 + (T_3T_\delta + T_\delta T_{ш} + T_3T_{ш})P^3 + (T_3 + T_\delta + T_{ш})P^2 + P. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Сравнение выражений (8) и (12) показывает, что в схеме САУ, где во втором контуре имеется регулятор 2, охваченный положительной обратной связью по интегратору, идентификатор задающего воздействия ψ_y является более простым, так как имеет меньший порядок. При этом инверторы (инерционная часть объекта управления) имеют одинаковую передаточную функцию $(1+T_3P)(1+T_\delta P)(1+T_{ш}P)$.

Передаточная функция двухконтурной системы по ошибке в соответствии с (8) определяется выражением:

$$W_\varepsilon^{(2)}(P) = \frac{A_1(P)[C_{pez2}(P) - B_{pez2}(P)P^{-\nu}]}{C_1(P)C_{pez2}(P)}. \quad (13)$$

где $C_{pez2}(P), B_{pez2}(P)$ – полиномы регулятора второго контура двухконтурной системы, эквивалентной комбинированной.

При синтезе регулятора необходимо его структуру и коэффициенты указанных полиномов. Из условий физической реализуемости зададим:

$$\left. \begin{aligned} B_{pez2}(P) &= b_0 + b_1P, \\ C_{pez2}(P) &= c_0 + c_1P. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Подставляя указанные полиномы в числитель выражения (13), получим следующее выражение в квадратных скобках:

$$C_0 + C_1 P - \frac{b_0}{P} - b_1. \quad (15)$$

Учитывая, что в данной разности не должно быть членов с отрицательными степенями P , необходимо положить $b_0 = 0$.

Кроме того, исходя из требования повышения порядка астатизма на один порядок, необходимо положить $b_1 = C_0$, что превратит эту разность в одночлен $C_1 P$.

В связи с этим, ПФ (13) примет вид:

$$W_{\varepsilon}^{(2)}(P) = \frac{A_1(P)}{C_1(P)} \cdot \frac{C_1 P}{C_0 + C_1 P}. \quad (16)$$

С учетом наличия в полиноме $A_1(P)$ свободного оператора P , а также аналогичного оператора при коэффициенте C_1 , получим в числителе ПФ по ошибке второго контура оператор P^2 . Следовательно, двухконтурная САУ имеет второй порядок астатизма.

При этом ПФ самого регулятора второго контура определяется в соответствии с выражением:

$$W_{pez2}(P) = \frac{B_{pez2}(P)}{C_{pez2}(P)} = \frac{b_1 P}{C_0 + C_1 P}. \quad (17)$$

Полином знаменателя регулятора второго контура входит в характеристический полином всей двухконтурной САУ:

$$C_k(P) = C_1(P)(C_0 + C_1 P). \quad (18)$$

Для устойчивости двухконтурной САУ (при условии, что полином $C_1(P)$ также устойчив), необходимо иметь

$$C_0 + C_1 P = 0 \Rightarrow P_1 = -\frac{C_0}{C_1} < 0. \quad (19)$$

Для того, чтобы корень P_1 находился на большем удалении от мнимой оси необходимо иметь условие $C_1 \ll C_0$.

С учетом выражений (12) и (16) можно записать более полное описание для ПФ по ошибке второго контура:

$$W_{\varepsilon}^{(2)}(P) = \frac{[(1 + T_{\partial} P)(1 + T_{\delta} P)(1 + T_{\mu} P)P]C_1 P}{[(1 + T_{\partial} P)(1 + T_{\delta} P)(1 + T_{\mu} P)P + K_v](C_0 + C_1 P)}. \quad (20)$$

Следует заметить, что выражение для функции чувствительности, определение которой было дано ранее, совпадает с выражением для передаточной функции по ошибке [1]. Поэтому выражения (13) и (16) можно рассматривать как функции чувствительности. Из данных выражений видно, что отношение полиномов $A_1(P)/C_1(P)$ – это функция чувствительности первого (основного) контура, а оставшееся выражение – это множитель, образованный вторым контуром (его регулятором) и влияний на функции чувствительности первого контура. Если, например, функция чувствительности первого контура не равна нулю, то ее можно уменьшить за счет множителя второго контура. В данном случае, это видно из выражения (16): если отношение полиномов $A_1(P)/C_1(P) \neq 0$, то при $P=0$ (установившийся режим) функция чувствительности двухконтурной системы управления углом курса РТК обращается в нуль.

Исходя из того, что необходимо найти ошибку в установившемся режиме при линейном законе входного воздействия $\psi_u = \psi_0 + \frac{d\psi}{dt}$, то, как показано в [1], коэффициенты ошибок $D_0 = 0$, $D_1 = \frac{1}{K_v}$. Следовательно, ошибка по положению ε_0 будет равна нулю и установившаяся ошибка будет равна только ошибке по скорости ε_v . Выражение для определения ошибки примет вид:

$$\varepsilon_v = D_1 \frac{d\psi}{dt} = \frac{\dot{\psi}_u}{K_v}. \quad (21)$$

Из вышесказанного и выражения (21) следует, что ошибка увеличивается с ростом скорости задающего воздействия $\dot{\psi}_u$.

С учетом того, что $C_1 \ll C_0$ и $T_1 \ll T_2$ получим следующий закон управления РТК:

$$u_k(t) = u_1(t) + u_2(t),$$

$$\begin{aligned} u_1(t) &= K_{ny}(1 + T_2 P) \varepsilon_{\psi}(t) = K_{ny} \varepsilon_{\psi}(t) + K_{ny} T_2 \frac{d\varepsilon_{\psi}(t)}{dt}, \quad p = \frac{d}{dt}, \\ u_2(t) &= \frac{B_{pec2}(P)}{C_{pec2}(P)} \left(\frac{1 + T_{oy} P}{K_v} \right) \psi_u(t) = \frac{b_1}{C_0 K_v} \frac{d}{dt} \psi_u(t) + \frac{b_1 T_{oy}}{C_0 K_v} \frac{d^2 \psi_u(t)}{dt^2}. \end{aligned} \quad (22)$$

Первое управление формируется по ошибке ε_{ψ} , а второе управление формируется по углу ψ_u .

Заключение. Предложенная в работе методика определения параметров структуры параметров регуляторов САУ движением РТК в автономном режиме показывает следующее:

САУ движением РТК по курсу является системой с переменными параметрами, т.к.:

- ♦ в двухканальном электроприводе появляются усилительное звено с коэффициентом « α » [$W(\alpha)$];

- ♦ в регуляторе такой САУ для уменьшения чувствительности к изменению « α » должно быть также усилительное звено с коэффициентом « α » [$K(\alpha)$].

В одноконтурных системах возможно повышение точности САУ за счет получения нулевой ошибки при постоянном входном воздействии.

В двухконтурных САУ движением РТК, эквивалентных комбинированным системам, при линейном законе входного воздействия возможно достижение инвариантности ошибки (уменьшения ее величины) за счет изменения (увеличения значения) коэффициента усиления системы K_v .

Показано, что при использовании двухконтурной системы при управлении углом курса РТК следящая система за целью по угловым координатам становится менее чувствительной к изменению параметров объекта управления (шасси и электропривода).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пушкарёв Ю.А., Пушкарева Е.Ю. Теория автоматического управления: учебник. – Серпухов: ФВА РВСН им. Петра Великого, 2020. – 476 с.
2. Свиридов В.В., Пушкарёв Ю.А. Модель оценки качества характеристик робототехнического комплекса для обнаружения нарушителей в лесистой местности // Математическое моделирование и численные методы. – 2021. – № 29. – С. 77-90.
3. Пушкарёв Ю.А., Свиридов В.В. Метод распознавания объектов на основе их сигнально-геометрических признаков средствами робототехнического комплекса охраны // Математическое моделирование и численные методы. – 2022. – Т. 34, № 9. – С. 88-106.

4. Вишняков Л.В., Ким В.Я. Моделирование поиска-обнаружения-распознавания по тепловизионному изображению с изменяющимся качеством // Известия РАН ТiСУ. – 2020. – № 6. – С. 96-108.
5. Пушкарёв Ю.А., Пушкарёва Е.Ю., Пискулин И.В. Управление робототехническим комплексом по углу курса на основе метода разности скоростей // Известия ИИФ. – 2022. – № 4. – С. 45-51.
6. Давыдов О.И., Платонов А.И. Метод определения параметров управления траекторией движения мобильного робота // Известия РАН ТiСУ. – 2017. – № 1. – С. 168-176.
7. Пушкарёв Ю.А., Пушкарёва Е.Ю., Пискулин И.В. Методика определения областей устойчивого движения робота по курсу при управлении по методу разностей скоростей. 4 ЦНИИ Минобороны России, г. Королев, 2022. – № 168. – Т. 1. – С. 45-54.
8. Richard C. Dorf, Robert H. Bishop. Modern Control Systems. – Fourth Edition. – Addison – Wesley, 1998. – 832 p.
9. Пушкарёв Ю.А., Пушкарёва Е.Ю. Системы автоматического управления в ракетно-космической технике. Задачи слежения и терминального управления: монография. – Серпухов, ФВА РВСН им. Петра Великого, 2020. – 379 с.
10. Пушкарёв Ю.А., Пушкарёва Е.Ю. Задачи и методы синтеза следящих и терминальных систем автоматического управления в ракетно-космической технике: монография. – Машиностроение – Полет, 2022. – 647 с.
11. Пушкарёв Ю.А., Пушкарёва Е.Ю. Методы синтеза следящих и терминальных автоматических систем высокой точности: монография. – Серпухов: ФВА РВСН им. Петра Великого, 2016. – 435 с.
12. Пушкарёв Ю.А., Родыгин В.А. Терминальный метод достижения инвариантности системы управления движением объекта // Известия РАН ТiСУ. – 2009. – № 6. – С. 12-18.
13. Пушкарёв Ю.А., Родыгин В.А. Критерий достижения инвариантности в детерминированных системах управления движением объектов // Известия РАН ТiСУ. – 2011. – № 4. – С. 37-47.
14. Крудько П.Д., Чхеидзе Г.А. Синтез алгоритмов управления следящих систем высокой динамической точности // Известия РАН. Техническая кибернетика. – 1992. – № 2. – С. 145-178.
15. Филаретов В.Ф., Южмеев Д.А. Метод формирования гладких траекторий движения мобильных роботов в неизвестном заранее окружении // Известия РАН ТiСУ. – 2017. – № 4. – С. 174-184.
16. Rao A.V. Survey of Numerical method for Optimal Control // Advances Astronautical Sciences. – 2010. – Vol. 135. – P. 497-528.
17. Корсунский В.А. Перспективы развития военных мобильных робототехнических комплексов наземного базирования в России. – М.: МГТУ им. Баумана, 2013. – 379 с.
18. Фазлетдинов И.Р. Перспективы применения робототехнических комплексов военного назначения в интересах Ракетных войск стратегического назначения // Военная мысль. – 2022. – № 5. – С. 105-111.
19. Скиба В.А. и др. Робототехнические комплексы военного назначения: учеб. пособие. – Балашиха: ВА РВСН им. Петра Великого, 2021. – 168 с.
20. Лопота А.В. Наземные робототехнические комплексы военного и специального назначения. – СПб.: ЦНИИ робототехники и технической кибернетики, 2016. – 29 с.

REFERENCES

1. Pushkarev Yu.A., Pushkareva E.Yu. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnik [Theory of automatic control: textbook]. Serpukhov: FVA RVSN im. Petra Velikogo, 2020, 476 p.
2. Sviridov V.V., Pushkarev Yu.A. Model' otsenki kachestva kharakteristik robototekhnicheskogo kompleksa dlya obnaruzheniya narushiteley v lesistoy mestnosti [A model for assessing the quality of characteristics of a robotic complex for detecting intruders in a wooded area], *Matematicheskoe modelirovaniye i chislennyye metody* [Mathematical modeling and numerical methods], 2021, No. 29, pp. 77-90.
3. Pushkarev Yu.A., Sviridov V.V. Metod raspoznavaniya ob"ektov na osnove ikh signal'no-geometricheskikh priznakov sredstvami robototekhnicheskogo kompleksa okhrany [Method of object recognition based on their signal-geometric features by means of a robotic security complex], *Matematicheskoe modelirovaniye i chislennyye metody* [Mathematical modeling and numerical methods], 2022, Vol. 34, No. 9, pp. 88-106.
4. Vishnyakov L.V., Kim V.Ya. Modelirovaniye poiska-obnaruzheniya-raspoznavaniya po teplovizionnomu izobrazheniyu s izmenyayushchimsya kachestvom [Modeling of search-detection-recognition based on a thermal image with varying quality], *Izvestiya RAN TiSU* [Izvestiya RAS TiSU], 2020, No. 6, pp. 96-108.

5. Pushkarev Yu.A., Pushkareva E.Yu., Piskulin I.V. Upravlenie robototekhnicheskimi kompleksami po uglu kursa na osnove metoda raznosti skorostey [Control of the robotic complex by the angle of the course based on the speed difference method], *Izvestiya IIF* [Izvestiya IIF], 2022, No. 4, pp. 45-51.
6. Davydov O.I., Platonov A.I. Metod opredeleniya parametrov upravleniya traektoriy dvizheniya mobil'nogo robota [Method of determining parameters of control of the trajectory of movement of a mobile robot], *Izvestiya RAN TiSU* [Izvestiya RAS TiSU], 2017, No. 1, pp. 168-176.
7. Pushkarev Yu.A., Pushkareva E.Yu., Piskulin I.V. Metodika opredeleniya oblastey ustoychivogo dvizheniya robota po kursu pri upravlenii po metodu raznostey skorostey [Methodology for determining the areas of stable movement of the robot along the course when controlled by the method of speed differences]. 4 TSNII Minoborony Rossii, g. Korolev, 2022, No. 168, Vol. 1, pp. 45-54.
8. Richard C. Dorf, Robert H. Bishop. Modern Control Systems. Fourth Edition. Addison – Wesley. 1998, 832 p.
9. Pushkarev Yu.A., Pushkareva E.Yu. Sistemy avtomaticheskogo upravleniya v raketno-kosmicheskoy tekhnike. Zadachi slezheniya i terminal'nogo upravleniya: monografiya [Automatic control systems in rocket and space technology. Tasks of tracking and terminal management: monograph]. Serpukhov, FVA RVSN im. Petra Velikogo, 2020, 379 p.
10. Pushkarev Yu.A., Pushkareva E.Yu. Zadachi i metody sinteza sledyashchikh i terminal'nykh sistem avtomaticheskogo upravleniya v raketno-kosmicheskoy tekhnike: monografiya [Tasks and methods of synthesis of tracking and terminal automatic control systems in rocket and space technology: monograph]. Mashinostroyeniye – Polet, 2022, 647 p.
11. Pushkarev Yu.A., Pushkareva E.Yu. Metody sinteza sledyashchikh i terminal'nykh avtomaticheskikh sistem vysokoy tochnosti: monografiya [Methods of synthesis of tracking and terminal automatic systems of high accuracy: monograph]. Serpukhov: FVA RVSN im. Petra Velikogo, 2016, 435 p.
12. Pushkarev Yu.A., Rodygin V.A. Terminal'nyy metod dostizheniya invariantnosti sistemy upravleniya dvizheniem ob"ekta [Terminal method of achieving invariance of the object motion control system], *Izvestiya RAN TiSU* [Izvestiya RAS TiSU], 2009, No. 6, pp. 12-18.
13. Pushkarev Yu.A., Rodygin V.A. Kriteriy dostizheniya invariantnosti v determinirovannykh sistemakh upravleniya dvizheniem ob"ektov [Criterion for achieving invariance in deterministic systems for controlling the movement of objects], *Izvestiya RAN TiSU* [Izvestiya RAS TiSU], 2011, No. 4, pp. 37-47.
14. Krud'ko P.D., Chkheidze G.A. Sintez algoritmov upravleniya sledyashchikh sistem vysokoy dinamicheskoy tochnosti [Synthesis of control algorithms for tracking systems of high dynamic accuracy], *Izvestiya RAN. Tekhnicheskaya kibernetika* [Izvestiya RAS. Technical cybernetics], 1992, No. 2, pp. 145-178.
15. Filaretov V.F., Yuzhimets D.A. Metod formirovaniya gladkikh traektoriy dvizheniya mobil'nykh robotov v neizvestnom zaranee okruzhении [Method of forming smooth trajectories of movement of mobile robots in an unknown environment in advance], *Izvestiya RAN TiSU* [Izvestiya RAS TiSU], 2017, No. 4, pp. 174-184.
16. Rao A.V. Survey of Numerical method for Optimal Control, *Advances Astronautical Sciences*, 2010, Vol. 135, pp. 497-528.
17. Korsunskiy V.A. Perspektivy razvitiya voennykh mobil'nykh robototekhnicheskikh kompleksov nazemnogo bazirovaniya v Rossii [Prospects for the development of military mobile robotic complexes of ground-based in Russia]. Moscow: MGTU im. Bauman, 2013, 379 p.
18. Fazletdinov I.R. Perspektivy primeneniya robototekhnicheskikh kompleksov voennogo naznacheniya v interesakh Raketnykh voysk strategicheskogo naznacheniya [Prospects for the use of military-purpose robotic complexes in the interests of Strategic Missile Forces], *Voennaya mysl'* [Military thought], 2022, No. 5, pp. 105-111.
19. Skiba V.A. i dr. Robototekhnicheskie komplekсы voennogo naznacheniya: ucheb. posobie [Robotic complexes for military purposes: a textbook]. Balashikha: VA RVSN im. Petra Velikogo, 2021, 168 p.
20. Lopota A.V. Nazemnye robototekhnicheskie komplekсы voennogo i spetsial'nogo naznacheniya [Ground-based robotic complexes for military and special purposes]. St. Petersburg: TSNII robototekhniki i tekhnicheskoy kibernetiki, 2016, 29 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. Е.А. Щедрин.

Пушкарева Елена Юрьевна – Филиал Военной академии РВСН им. Петра Великого; e-mail: calgon100@yandex.ru; г. Серпухов, Россия; тел.: 89151927439; д.т.н.; профессор.

Пискулин Игорь Викторович – e-mail: pikselzte@gmail.com; тел.: 89257250636; преподаватель.

Pushkareva Elena Yuryevna – Branch of the Military Academy of the Peter the Great Strategic Missile Forces; e-mail: calgon100@yandex.ru; Serpukhov, Russia; phone: +79151927439; dr. of eng. sc.; professor.

Piskulin Igor Viktorovich – e-mail: pikselzte@gmail.com; phone: +79257250636; lecturer.

УДК 004.81: 004.75

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-100-109

К.Ч. Бжихатлов, И.А. Пшенокова, А.У. Заммоев, Л.Б. Кокова
АВТОНОМНЫЙ РОБОТ ДЛЯ МОНИТОРИНГА НАЗЕМНЫХ
АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ РАСКОПОК

Огромный интерес к культурному наследию отражает желание человека знать и понимать свое происхождение и достижения. Однако, археологические памятники, как и природная среда, являются конечными не возобновляемыми ресурсами. Среди всех видов наследия, находящихся под угрозой, археологические памятники и их богатство информации и артефактов находятся под наибольшей угрозой. В современной практике варианты сохранения археологических памятников включают реконструкцию, повторную сборку (анастилез), сохранение и заципиту in situ, включая укрытия и/или консолидацию тканей, сохранение ex situ путем перемещения, а также перезахоронение с интерпретацией участка или без нее. Однако, очень важно при проведении археологических раскопок не перемещать и не терять артефакты. При утрате или перемещении теряется их информационный потенциал. С целью обеспечения постоянного контроля процесса археологических изысканий, фиксации найденных артефактов, построения трехмерной модели изучаемого объекта и обеспечения безопасности на участке разработана система мониторинга раскопок, развернутая на автономном роботе. Задача данного исследования – разработка аппаратного и программного обеспечения робота. Робот представляет собой подвесную платформу сбора данных, перемещение которой обеспечивается несколькими тросами, закрепленными на неподвижных опорах. Перемещение платформы (как в плоскости, так и по высоте) обеспечивается за счет изменения длины тросов. Подобная схема перемещения позволяет обеспечить возможность перемещения платформы во всей плоскости треугольника, образуемого неподвижными опорами, а также спускаться или подниматься до высоты, ограниченной высотой самих опор. Платформа сбора данных, представляет собой плоскую платформу с установленной на ней модулем связи, микроконтроллером и аккумулятором. Снизу прикреплен гиростабилизатор, с закрепленными на нем видеокамерой и дальномером, который позволяет погасить колебания при движении платформы и внешних возмущениях. Представлен мультиагентный алгоритм работы системы мониторинга робота в процессе раскопок. Разработана программа для управления и сбора данных с системы мониторинга археологических объектов. Для апробации системы мониторинга изготовлен прототип робота, который был протестирован во время раскопок комплекса археологических памятников в Баксанском районе Кабардино-Балкарской республики.

Автономный робот, археологические раскопки, система мониторинга, мультиагентные системы.

K.Ch. Bzhikhatlov, I.A. Pshenokova, A.U. Zammoev
AUTONOMOUS ROBOT FOR MONITORING GROUND
ARCHAEOLOGICAL SITES

The great interest in cultural heritage reflects a person's desire to know and understand their origins and achievements. However, archaeological sites, like the natural environment, are finite non-renewable resources. Of all the types of heritage under threat, archaeological sites and their wealth of information and artifacts are the most threatened. In current practice, options for the preservation of archaeological sites include reconstruction, reassembly (anastilosis), in situ