

20. Svetlichny A.M., Naumchenko A.S., Svetlichnaya L.A., Zhityaev I.L. Metody izolyatsii elementov mikro- i nanostruktur: ucheb. posobie [Methods of isolation of elements of micro- and nanostructures: textbook]. Rostov-on-Don: Izd. YuFU, 2014, 56 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., член-корреспондент РАЕН А.В. Ковалев.

**Грицаенко Павел Григорьевич** – Южный федеральный университет; e-mail: dsp@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел. 88634393075; к.т.н.; с.н.с.; гл. специалист научно конструкторского бюро цифровой обработки сигналов.

**Gritzaenko Pavel Gregory** – Southern Federal University; e-mail: dsp@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: 88634393075; cand. of eng. sc., senior researcher; chief specialist of the scientific design bureau of digital signal processing.

УДК 681.5

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-137-148

**И.В. Пискулин**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ МОДЕЛЕЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РТК ВН В РЕЖИМЕ АВТОНОМНОГО НАВЕДЕНИЯ**

*Эффективность применения автономных мобильных роботов во многом зависит от системы управления движением. Для экипажной машины вопрос подбора оптимальной скорости движения решает механик-водитель. Скорость движения автономных роботов, особенно по сильно пересечённой местности, существенно ниже и вызвано это работой автономной системы управления. В гусеничных шасси одной из составляющих быстроходности известно такое свойство, как поворотливость, которая характеризует управляемость транспортным средством в заданных условиях. Целью исследования является повышение эффективности функционирования систем автоматического управления (САУ) движением наземных робототехнических комплексов военного назначения (РТК ВН) по курсу на основе применения метода двухконтурных систем, эквивалентных комбинированным. 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 является экспериментальное определение зависимостей установившегося значения ошибки воспроизведения угла курса при постоянном и линейном входных воздействиях в одноконтурных и двухконтурных системах автоматического управления движением РТК. В ходе работы предложено составить структурные схемы систем автоматического управления движением РТК ВН по углу курса, на основании структурных схем разработать модели для проведения экспериментальных исследований предложенного подхода методами компьютерного моделирования. В ходе исследования предлагается провести анализ точности воспроизведения угла курса на основе полученных в результате моделирования данных. В рамках проводимых работ рассмотрена задача построения систем управления движением автономных мобильных гусеничных машин и роботов. Предложена модель системы автоматического управления движением гусеничных РТК на основе применения метода двухконтурных систем, эквивалентных комбинированным. Результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенного подхода и показывают, что удастся получить улучшенные показатели функционирования системы управления по точности и оперативности. Предложенный в статье метод позволяет решать задачу повышения эффективности работы системы управления движением РТК по углу курса в автономном режиме.*

*Робототехнический комплекс; система управления движением; угол курса; метод двухконтурных систем; модель; моделирование.*

I.V. Piskulin

## INVESTIGATION OF THE ACCURACY OF MODELS OF THE TRACKING SYSTEM OF THE RTK VN MOTION CONTROL IN THE AUTONOMOUS GUIDANCE MODE

*The effectiveness of the use of autonomous mobile robots largely depends on the motion control system. For a crew car, the question of selecting the optimal driving speed is decided by the driver. The speed of movement of autonomous robots, especially over very rough terrain, is significantly lower and this is caused by the operation of an autonomous control system. In tracked chassis, one of the components of speed is known to have such a property as agility, which characterizes the controllability of a vehicle under specified conditions. The aim of the study is to increase the efficiency of automatic control systems (ACS) for the movement of ground-based robotic systems for military purposes (RTK VN) on the course based on the application of the method of two-circuit systems equivalent to combined. 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 to experimentally determine the dependences of the steady-state value of the error of reproducing the angle of the course with constant and linear input influences in single-circuit and double-circuit automatic motion control systems of the RTK. In the course of the work, it was proposed to draw up structural diagrams of automatic traffic control systems of the RTK VN along the course angle, based on structural diagrams to develop models for conducting experimental studies of the proposed approach by computer modeling methods. In the course of the study, it is proposed to analyze the accuracy of reproducing the angle of the course based on the data obtained as a result of modeling. As part of the ongoing work, the task of building motion control systems for autonomous mobile tracked vehicles and robots is considered. A model of the automatic motion control system of tracked RTCs is proposed based on the application of the method of two-circuit systems equivalent to combined ones. The simulation results confirm the efficiency of the proposed approach and show that it is possible to obtain improved indicators of the functioning of the control system in terms of accuracy and efficiency. The method proposed in the article allows us to solve the problem of improving the efficiency of the RTK motion control system along the course angle in offline mode.*

*Robotic complex; motion control system; course angle; method of two-circuit systems; model; simulation.*

**Введение.** На протяжении последних двадцати лет мирового развития вооружения и военной техники (ВВТ) проблема их роботизации приобрела не только роль ключевого научно-технологического направления, но и стала одним из центральных звеньев в новых концептуальных подходах к формированию вооруженных сил, способам их боевого применения, развитию средств вооруженной борьбы и средств обеспечения. Как показывает отечественный и зарубежный опыт создания перспективных образцов ВВТ, неременным и обязательным условием успешного развития средств военной и специальной робототехники является своевременное создание научно-технического задела, являющегося базой для новых разработок и производства – как совокупность потенциальных инноваций, которые могут обеспечить создание перспективных робототехнических комплексов. Внедрение подобных инноваций позволяет обеспечить решение принципиально новых военно-технических и специальных задач и существенный прирост тактико-технических характеристик робототехнических комплексов. Научно-технический задел в области военной и специальной робототехники можно трактовать как совокупность потенциальных инноваций, которые при определенных условиях (наличие соответствующих решений органов государственного и военного управления, производственные и экономические возможности как государства в целом, так и отдельных предприятий и др.) могут обеспечить создание перспективных робототехнических комплексов (РТК) военного и специального назначения [19–24].

Целями исследования по созданию робототехнических комплексов на базе гусеничных бронированных машин являются:

- ◆ разработка предложений и научно-технического задела по созданию ряда робототехнических комплексов на основе перспективных технических и информационных технологий;

- ◆ разработка научно-технического задела и технических решений по созданию многофункционального робототехнического комплекса боевого, разведывательного, технического и тылового обеспечения среднего класса.

В результате обобщения накопленного опыта при создании описываемых выше робототехнических комплексов, а также с учетом выбранного направления роботизации существующих образцов военной техники, создана концепция создания унифицированной системы управления (СУ) робототехническими комплексами.

В состав данной системы управления предлагается включить следующие подсистемы:

- ◆ центральная вычислительная система;
- ◆ система связи и передачи данных;
- ◆ система электропитания;
- ◆ система управления движением;
- ◆ система технического зрения;
- ◆ система навигации;
- ◆ полезная нагрузка, в которую может входить боевой модуль, модуль разведки, модуль минирования/разминирования и др. [22, 24].

В данной работе проводится исследование одной из указанных подсистем, а именно системы автоматического управления движением РТК ВН в автономном режиме. Необходимость данного исследования вызвана возможным применением РТК в целях выполнения охранных функций для обеспечения безопасности объектов ракетных войск стратегического назначения (РВСН) от воздействия диверсионно-разведывательных и террористических групп противника [2–5, 23].

Основными задачами, решаемыми РТК в условиях боевых действий, могут являться:

- ◆ охрана особо важных объектов;
- ◆ разведка всех видов;
- ◆ боевое, огневое и ударное противодействие огневым средствам, живой силе и атакующей технике противника, в том числе и борьба со снайперами;
- ◆ выполнение операций без непосредственного участия человека (военнослужащего), например, преодоление участков радиационного, химического и бактериологического заражения местности и выполнение операций в контакте с агрессивными средами [5].

**Формальная постановка задачи.** Допустим, что параметры структурных схем систем автоматического управления движением РТК по углу курса в автономном режиме, в которых возможно достижение нулевой ошибки воспроизведения угла курса, определены с использованием метода двухконтурных систем, эквивалентных комбинированным. На основании структурных схем необходимо осуществить построение моделей систем автоматического управления для проведения экспериментальных исследований предложенного подхода методами компьютерного моделирования. Экспериментальные исследования точности моделей систем автоматического управления предлагается осуществить в 2 этапа.

На первом этапе исследованию подлежит модель одноконтурной САУ движением РТК по курсу, в ходе моделирования необходимо определить связь ошибок в условиях изменяющихся параметров входного воздействия.

На втором этапе исследованию подлежит модель двухконтурной САУ движением РТК по курсу, эквивалентной комбинированной системе, в ходе моделирования необходимо определить связь ошибок в условиях изменяющихся параметров входного воздействия.

На основе результатов моделирования требуется оценить возможность применения моделей САУ движением РТК, работоспособность предложенного подхода в целях получения улучшенных показателей функционирования системы управления.

В ходе выполнения охранных мероприятий РТК должен осуществлять задачи обнаружения, распознавания и измерения координат и параметров движения объектов вторжения в охраняемую зону. Как показано в [2, 3] высококачественное обнаружение и распознавание объекта вторжения производится в процессе сближения с ним. При этом, уменьшение дальности до искомого объекта улучшает линейное разрешение на его поверхности и увеличивает отношение сигнал/шум. Также увеличивается наблюдаемая площадь, так как уменьшается степень загромождаемости искомого объекта другими объектами и рельефом местности.

С учетом, того что объекты РВСН могут размещаться 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 [5, 6]. Вариант исполнения РТК ВН гусеничного типа представлен на рис. 1.



Рис. 1. Гусеничный мобильный робот

Мобильная часть робота представлена гусеничным модулем с независимыми приводами, которые позволяют получать требуемые скорости движения. Двигатели правой, левой гусениц могут быть электрическими или гидравлическими. Выполнение технологических операций в автоматическом режиме осуществляется при помощи манипуляционного механизма. Обмен информацией осуществляется специальной аппаратурой передачи данных.

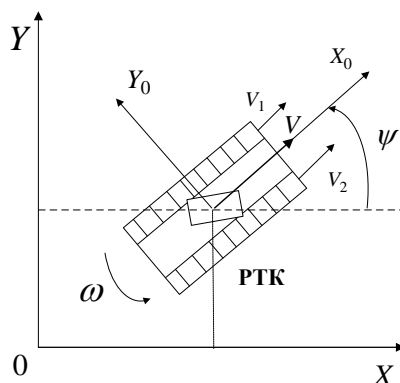


Рис. 2. Схема движения мобильного гусеничного РТК на плоскости

На указанной схеме:  $v_2$  – скорость внешней гусеницы;  $v_1$  – скорость внутренней гусеницы;  $V$  – поступательная скорость;  $\omega$  – угловая скорость поворота относительно центра масс;  $\psi$  – угол поворота.

Использование РТК гусеничного типа приводит к необходимости применения метода управления углом курса РТК по разности скоростей [5, 6]. Особенностью САУ, реализующей метод разности скоростей является то, что в разомкнутой части системы управления должны быть два канала передачи управляющего воздействия (на одну ленту и на другую). Один из вариантов такой САУ углом курса показан на рис. 3.

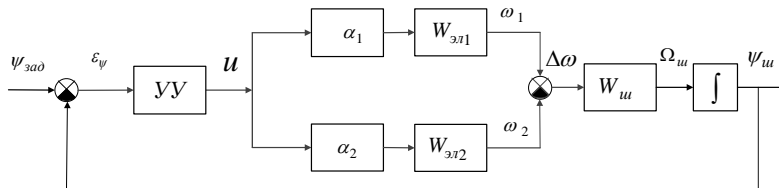


Рис. 3. Структурная схема двухканальной замкнутой САУ углом курса по методу разностей скоростей

На данном рисунке  $\varepsilon_\psi$  – ошибка воспроизведения заданного угла курса  $\psi_{зад}$ ,  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты усиления усилительных звеньев первого и второго каналов управления соответственно (коэффициенты подвижности, которые определяются отношением угловых скоростей  $\omega_1, \omega_2$ );  $\Omega_{ш}$  – угловая скорость гусеничного мобильного робота (рысканья), интегрирование которой дает угол курса шасси робота  $\psi_{ш}$ .

Кроме того, на данном рисунке УУ – устройство управления (регулятор),  $u$  – управляющее воздействие,  $W_{эл1}, W_{эл2}$  – динамические операторы электроприводов первого и второго каналов управления,  $W_{ш}$  – динамический оператор шасси.

Для решения задачи автономного управления модулем движения мобильного робота предлагается использовать систему управления, содержащую аппаратные средства захвата и анализа изображений, а также управления движением. Для захвата изображения рабочей зоны используется цифровая видеокамера, связанная с системой анализа изображений, представляющей собой комплекс программных и аппаратных средств. Система анализа изображений обрабатывает поток, поступающий с цифровой видеокамеры, и преобразует его в набор параметров, на основе которых система управления движением формирует управляющие воздействия исполнительным механизмам робота.

**1. Исследование точности модели одноконтурной САУ движением РТК в автономном режиме при изменении параметров входного воздействия.** В целях исследования точности модели САУ движением РТК произведено составление схемы, соответствующей указанной модели на рисунке 3 в программе «Simulink».

Задание параметров систем автоматического управления углом курса и входных воздействий.

Передаточные функции электромашинного усилителя  $W_3(P)$ , электродвигателя  $W_0(P)$  и шасси  $W_{ш}(P)$  имеют вид [1, 8, 9]:

$$W_3(P) = \frac{1,5}{0,02P + 1}; W_0(P) = \frac{1}{0,2P + 1}; W_{ш}(P) = \frac{1,5}{P + 1}. \quad (1)$$

В системе заданы следующие коэффициенты подвижности  $\alpha$  и коэффициенты инверсии  $K(\alpha)$ :

$$\alpha = 3, K(\alpha) = \frac{1}{(\alpha - 1)} = 0,5. \quad (2)$$

В ходе работы по исследованию модели приняты следующие допущения: параметры с аппаратных средств захвата и анализа изображений поступают в виде следующих данных:

♦ угол курса является величиной постоянной (цель неподвижна), при этом выбраны следующие значения  $\psi_{ц} = 2;3;5 \text{град}$ ;

♦ угол курса является величиной, изменяющейся по линейному закону (цель перемещается), при этом выбраны следующие значения  $\dot{\psi}_{ц} = 0,5;1;2 \text{рад/с}$ .

Результаты исследования получены при сравнении графиков значения ошибки управления движением по углу курса в автономном режиме управления, которые отражаются в программе на осциллограмме и представлены на рис. 4, 5.

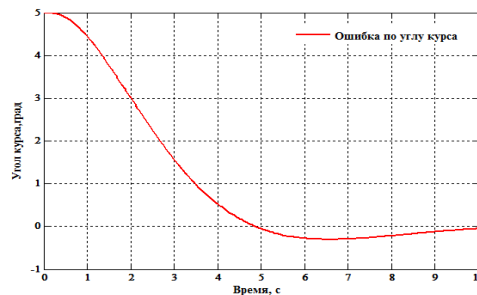


Рис. 4. К иллюстрации ошибки воспроизведения угла курса одноконтурной САУ РТК при постоянном входном воздействии

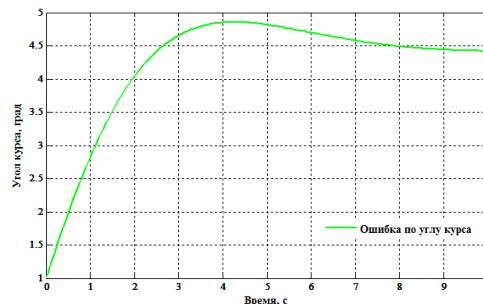


Рис. 5. К иллюстрации ошибки воспроизведения угла курса одноконтурной САУ РТК при линейном входном воздействии

В соответствии с представленными графиками выявлено следующее:

♦ при исследовании модели одноконтурной САУ движение РТК значение установившейся ошибки воспроизведения угла курса в условиях различных значений постоянного входного воздействия получается равным нулю.

♦ при увеличении значения угловой скорости, т.е. линейного входного воздействия, возрастает значение установившейся ошибки. Так, например при значении входного воздействия  $\dot{\psi}_{ц} = 0,5 \text{рад/с}$  значение установившейся ошибки со-

ставляет  $\varepsilon_{\psi} = 1,1 \text{grad}$ , а при значении входного воздействия  $\dot{\psi}_u = 2 \text{rad/c}$  в соответствии с графиком рис. 5 значение установившейся ошибки составляет  $\varepsilon_{\psi} = 4,4 \text{grad}$ .

Из анализа полученных результатов экспериментальных исследований можно сделать выводы:

1. В одноконтурных САУ движением РТК по углу курса при постоянном входном воздействии возможно достижение нулевой ошибки воспроизведения угла курса, таким образом, точность системы управления в установившемся режиме является высокой. Высокие показатели точности системы объясняется выражениями в соответствии с [1, 12–14] для определения ошибок:

$$\varepsilon_{\psi} = D_0 \psi_u + D_1 \frac{d\psi_u}{dt}, \quad (3)$$

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

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

2. Изменение параметров линейного входного воздействия одноконтурной САУ движением РТК по углу курса (увеличение значений) приводит к увеличению ошибки, а значит и уменьшению точности системы управления.

В связи с указанными обстоятельствами можно сказать, что модель одноконтурной САУ движением РТК в автономном режиме позволяет достигать инвариантности ошибки воспроизведения угла курса при постоянном входном воздействии.

**2. Исследование точности модели двухконтурной САУ движением РТК, эквивалентной комбинированной системе, в автономном режиме при изменении параметров входного воздействия.** В целях исследования точности модели САУ движением РТК произведено составление схемы, основанной на методе построения двухконтурных систем, эквивалентных комбинированным системам [12–14, 16, 17]. Структурная схема двухконтурной САУ движением РТК представлена на рис. 6.

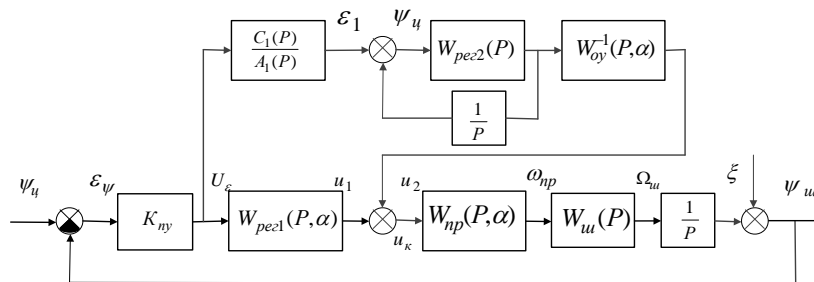


Рис. 6. Структурная схема двухконтурной САУ, эквивалентная комбинированной системе

На указанной схеме  $\psi_u$  – угол курса РТК относительно цели;  $\varepsilon_{\psi}$  – ошибка воспроизведения угла курса;  $U_{\varepsilon}$  – сигнал от идентификационного устройства;  $u_1, u_2, u_k$  – управление первого контура, управление второго контура, комбинированное управление соответственно;  $\omega_{np}$  – угловая скорость вала привода;  $\Omega_u$  – скорость поворота шасси;  $\xi$  – воздействие от возмущения;  $\psi_u$  – угол курса

движения РТК;  $W_{pez1}(P, \alpha), W_{pez2}(P), W_{np}(P, \alpha), W_{ш}(P)$  – передаточные функции регуляторов 1,2, привода, шасси РТК. Блок с ПФ  $W_{OY}^{-1}(P, \alpha)$  осуществляет инверсию ПФ  $W_{OY}(P)$ . На основании структурной схемы рис.6 произведено составление схемы в программе «Simulink» для исследования точности модели САУ движением РТК.

Параметры системы автоматического управления углом курса и входных воздействий остаются такими же, что при исследовании одноконтурной системы, за исключением структуры второго контура двухконтурной САУ. Отношение полиномов  $C_1(P)/A_1(P)$  и передаточные функции регулятора второго контура  $W_{pez2}(P)$ , а также блока, осуществляющего инверсию ПФ объекта управления  $W^{-1}_{OY}(P, \alpha)$ , имеют вид [13, 14]:

$$\frac{C_1(P)}{A_1(P)} = \frac{0,02P^3 + 0,3P^2 + 3P + 1}{0,02P^3 + 0,3P^2 + 3P}; W_{pez2}(P) = \frac{P}{0,1P + 1}; W^{-1}_{OY}(P) = \frac{0,2P + 1}{0,02P + 1}. \quad (4)$$

Результаты исследования получены при сравнении графиков значения ошибки управления движением по углу курса в автономном режиме управления, которые отражаются в программе на осциллограмме и представлены на рис. 7, 8.

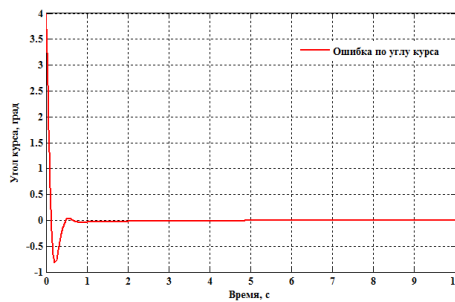


Рис. 7. К иллюстрации ошибки воспроизведения угла курса двухконтурной САУ РТК, эквивалентной комбинированной при постоянном входном воздействии

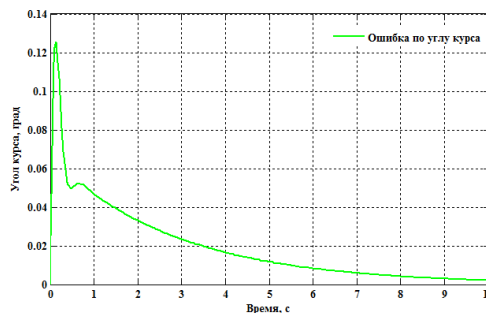


Рис. 8. К иллюстрации ошибки воспроизведения угла курса двухконтурной САУ РТК, эквивалентной комбинированной при линейном входном воздействии

В соответствии с представленными графиками выявлено следующее:

- ♦ при исследовании модели двухконтурной САУ движения РТК по углу курса, эквивалентной комбинированной системе, значение установившейся ошибки воспроизведения угла курса в условиях постоянного и линейного входных воздействий равно нулю.



Кроме этого проведен сравнительный анализ графиков установившейся ошибки воспроизведения угла курса одноконтурной САУ и двухконтурной САУ движением РТК, эквивалентной комбинированной системе. Графики исследования моделей указанных САУ при одинаковых исходных данных представлены на рис. 9.

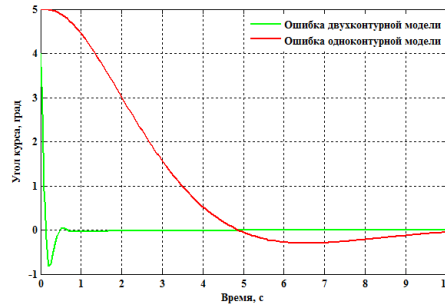


Рис. 9. К иллюстрации ошибки воспроизведения угла курса при постоянном входном воздействии

Из графических зависимостей рис. 9 видно, что для модели двухконтурной САУ движением РТК по углу курса, эквивалентной комбинированной системе, в целях достижения установившегося значения нулевой ошибки требуется значительно меньше времени относительно одноконтурной модели, т.е. создается возможность повышения быстродействия отработки угла курса. В связи с вышеописанными обстоятельствами использование модели САУ движением РТК ВН по курсу, для построения которых применяется метод двухконтурных систем автоматического управления, эквивалентных комбинированным системам, позволяет кроме достижения инвариантности ошибки с соблюдением требования к устойчивости системы повысить быстродействие. Таким образом осуществляется выполнения критерия вида «точность плюс оперативность». Применение системы автоматического управления движением РТК на основе указанных моделей как подсистемы может повысить точность и оперативность работы всей системы управления РТК ВН.

**Заключение.** На основании выполненных исследований показана целесообразность и эффективность использования для управления автономными мобильными гусеничными машинами и роботами в условиях постоянного и линейного входных воздействий моделей систем автоматического управления движением РТК по курсу, построенных на основе метода двухконтурных систем, эквивалентных комбинированным, обеспечивающих автономное управление.

Результаты моделирования и экспериментальные исследования показали работоспособность и надежность использования указанного метода построения САУ. Предложен метод построения управляющих систем, которые являются основой создания систем управления автономными мобильными машинами и роботами.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пушкарев Ю.А., Пушкарева Е.Ю. Теория автоматического управления: учебник. – Серпухов, ФВА РВСН им. Петра Великого, 2020. – 476 с.
2. Свиридов В.В., Пушкарев 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. Пушкарев 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 ТИСУ. – 2020. – № 6. – С. 96-108.

5. Свиридов В.В. Применение робототехнических комплексов охраны и обороны критически важных объектов Ракетных войск стратегического назначения // Военная мысль. 2021. – № 6. – С. 57-64.
6. Пушкарёв Ю.А., Пушкарева Е.Ю., Пискулин И.В. Управление робототехническим комплексом по углу курса на основе метода разности скоростей // Известия ИИФ. – 2022. – № 4. – С. 45-51.
7. Давыдов О.И., Платонов А.И. Метод определения параметров управления траекторией движения мобильного робота // Известия РАН ТИСУ. – 2017. – № 1. – С. 168-176.
8. Пушкарёв Ю.А., Пушкарева 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.
9. Richard C. Dorf, Robert H. Bishop. Modern Control Systems. – Fourth Edition. – Addison – Wesley, 1998. – 832 p.
10. Ramon Gonzalez, Mirko Fiacchini, Teodoro Alamo, Jose Luis Guzman, Francisco Rodrigue. Adaptive Control for a Mobile Robot under slip conditions. Department of Systems Engineering and Automatic, University of Seville, Seville, Spain, 2011.
11. Anh Tuan Le. Modeling and Control of Tracked Vehicle», Department of Mechanical and Mechatronic Engineering, University of Sydney, Australia, 1999.
12. Пушкарёв Ю.А., Пушкарева Е.Ю. Системы автоматического управления в ракетно-космической технике. Задачи слежения и терминального управления: монография. – Серпухов, ФВА РВСН им. Петра Великого, 2020. – 379 с.
13. Пушкарёв Ю.А., Пушкарева Е.Ю. Задачи и методы синтеза следящих и терминальных систем автоматического управления в ракетно-космической технике: монография. – Машиностроение – Полет, 2022. – 647 с.
14. Пушкарёв Ю.А., Пушкарева Е.Ю. Методы синтеза следящих и терминальных автоматических систем высокой точности: монография. – Серпухов, ФВА РВСН им. Петра Великого, 2016. – 435 с.
15. Пушкарёв Ю.А., Родыгин В.А. Терминальный метод достижения инвариантности системы управления движением объекта // Известия РАН ТИСУ. – 2009. – № 6. – С. 12-18.
16. Пушкарёв Ю.А., Родыгин В.А. Критерий достижения инвариантности в детерминированных системах управления движением объектов // Известия РАН ТИСУ. – 2011. – № 4. – С. 37-47.
17. Крудько П.Д., Чхеидзе Г.А. Синтез алгоритмов управления следящих систем высокой динамической точности // Известия РАН. Техническая кибернетика. – 1992. – № 2. – С. 145-178.
18. Rao A.V. Survey of Numerical method for Optimal Control // Advances Astronautical Selences. – 2010. – Vol. 135. – P. 497-528.
19. Корсунский В.А. Перспективы развития военных мобильных робототехнических комплексов наземного базирования в России. – М.: МГТУ им. Баумана, 2013. – 379 с.
20. Скиба В.А. и др. Робототехнические комплексы военного назначения: учеб. пособие. – Балашиха: ВА РВСН им. Петра Великого, 2021. – 168 с.
21. Лопота А.В. Наземные робототехнические комплексы военного и специального назначения. – СПб: ЦНИИ робототехники и технической кибернетики, 2016. – 29 с.
22. Латинов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В. Опыт создания автономных мобильных робототехнических комплексов специального назначения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. «Специальная робототехника и мехатроника». – 2011. – С. 7-24.
23. Рубцов И.В. Вопросы состояния и перспективы развития отечественной наземной робототехники военного и специального назначения // Избранные Труды Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – 2015. – Т. II. – С. 64-70.

## REFERENCES

1. Pushkarev Yu.A., Pushkareva E.Yu. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnik [Theory of automatic control: textbook]. Serpukhov: FVA RVSН 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 modelirovanie 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 modelirovanie i chislennye metody* [Mathematical modeling and numerical methods], 2022, Vol. 34, No. 9, pp. 88-106.
4. *Vishnyakov L.V., Kim V.Ya.* Modelirovanie 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. *Sviridov V.V.* Primenenie robototekhnicheskikh kompleksov okhrany i oborony kriticheski vaznykh ob"ektov Raketnykh voysk strategicheskogo naznacheniya [Application of robotic complexes for the protection and defense of critical objects of Strategic Missile Forces], *Voennaya mysl'* [Military thought], 2021, No. 6, pp. 57-64.
6. *Pushkarev Yu.A., Pushkareva E.Yu., Piskulin I.V.* Upravlenie robototekhnicheskim kompleksom po uglu kursa na osnove metoda raznosti skorostey [Control of a robotic complex by course angle based on the speed difference method], *Izvestiya IIF* [Izvestiya IIF], 2022, No. 4, pp. 45-51.
7. *Davydov O.I., Platonov A.I.* Metod opredeleniya parametrov upravleniya traektoriiy 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.
8. *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.
9. *Richard C. Dorf, Robert H. Bishop.* Modern Control Systems. Fourth Edition. Addison – Wesley, 1998, 832 p.
10. *Ramon Gonzalez, Mirko Fiacchini, Teodoro Alamo, Jose Luis Guzman, Francisco Rodrigue.* Adaptive Control for a Mobile Robot under slip conditions. Department of Systems Engineering and Automatic, University of Seville, Seville, Spain, 2011.
11. *Anh Tuan Le.* Modeling and Control of Tracked Vehicle», Department of Mechanical and Mechatronic Engineering, University of Sydney, Australia, 1999.
12. *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.
13. *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]. Mashinostroenie – Polet, 2022, 647 p.
14. *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 Veli-kogo, 2016, 435 p.
15. *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.
16. *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.
17. *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 of the RAS. Technical cybernetics], 1992, No. 2, pp. 145-178.
18. *Rao A.V.* Survey of Numerical method for Optimal Control, *Advances Astronautical Selences*, 2010, Vol. 135, pp. 497-528.

19. *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. Baumana, 2013, 379 p.
20. *Skiba V.A. i dr.* Robototekhnicheskie komplekсы voennogo naznacheniya: ucheb. posobie [Robotic complexes for military purposes: studies. stipend]. Balashikha: VA RVSN im. Petra Velikogo, 2021, 168 p.
21. *Lopota A.V.* Nazemnye robototekhnicheskie komplekсы voennogo i spetsial'nogo naznacheniya [Ground-based robotic complexes for military and special purposes]. St. Petersburg: TSNI robototekhniki i tekhnicheskoy kibernetiki, 2016, 29 p.
22. *Lapshov V.S., Noskov V.P., Rubtsov I.V.* Opyt sozdaniya avtonomnykh mobil'nykh robototekhnicheskikh kompleksov spetsial'nogo naznacheniya [Experience in creating autonomous mobile robotic-technical complexes for special purposes], *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. «Spetsial'naya robototekhnika i mekhatronika»* [Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. "Special robotics and mechatronics"], 2011, pp. 7-24.
23. *Rubtsov I.V.* Voprosy sostoyaniya i perspektivy razvitiya otechestvennoy nazemnoy robototekhniki voennogo i spetsial'nogo naznacheniya [Issues of the state and prospects of development of domestic ground-based robotics for military and special purposes], *Izbrannye Trudy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Selected Works of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Perspective systems and management tasks"], 2015, Vol. II, pp. 64-70.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. профессор Ю.А. Пушкарев.

**Пискулин Игорь Викторович** – Филиал Военной академии РВСН имени Петра Великого; e-mail: pikselzte@gmail.com; г. Серпухов, Россия; тел.: 89257250636; преподаватель.

**Piskulin Igor Viktorovich** – Branch of the Military Academy of the Peter the Great Strategic Missile Forces; e-mail: pikselzte@gmail.com; Serpukhov, Russia; phone: +79257250636; lecturer.

УДК 621.375.9

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-148-156

**Н.Н. Прокопенко, Д.В. Клейменкин, М.А. Сергеенко**

### **СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ «ПЕРЕГНУТОГО» КАСКАДА\***

*Предлагаются три схемотехнических приема, обеспечивающих (при одновременном использовании) повышение более чем на два порядка максимальной скорости нарастания выходного напряжения (SR) микроэлектронных операционных усилителей (ОУ) на биполярных транзисторах с классической архитектурой, предназначенных для работы в системах автоматического управления, радиотехники и связи, например, в качестве драйверов сверхбыстродействующих аналого-цифровых преобразователей (ЕVIOAS150, ЕVIOAS350, AD9208, AD9691, 1273ПВ14 и др.). Рассматриваемые ОУ содержат каскадный входной каскад с нелинейной коррекцией проходной характеристики и цепью следящей связи, повышающей коэффициент ослабления входных синфазных сигналов и коэффициент подавления помех по шинам питания, а также промежуточный каскад на основе «перегнутого» каскада. Применение «перегнутого» каскада позволяет повысить эффективность использования напряжений источников питания, а также увеличить частоту единичного усиления скорректированного ОУ. Однако, такой промежуточный каскад является существенным нелинейным звеном, ограничивающим максимальные выходные токи, перезаряжающие корректирующий конденсатор ОУ. Приводятся результаты компьютерного моделирования двух модификаций ОУ АmpSR1, АmpSR2, отличающихся друг от друга структурой нелинейного параллельного канала, устраняющего динамическую перегрузку «перегнутого»*

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-29-00637).