

УДК 621.865.8

DOI 10.35211/1990-5297-2024-4-287-88-94

Н. Г. Шаронов¹, В. Е. Пряничников², Н. В. Коломин¹, М. Ю. Ветлицын¹
МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯМИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА
С КИНЕМАТИЧЕСКИ СВЯЗАННЫМИ
ЦИКЛОВЫМИ ШАГАЮЩИМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ*

¹ Волгоградский государственный технический университет² Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН

dpm@vstu.com

Обсуждаются методы управления побортно кинематически связанными цикловыми шагающими движителями наземного мобильного робота. Приведено сравнение различных алгоритмов движения по относительно ровной поверхности. Рассмотрены варианты систем удаленного и дистанционного управления с частотным регулированием электропривода шагающих движителей.

Ключевые слова: цикловой механизм шагания, мобильный робот, электропривод.

N. G. Sharonov¹, V. E. Pryanichnikov², N. V. Kolomin¹, M. Y. Vedityn¹
MOTOR CONTROL METHODS FOR A MOBILE ROBOT WITH KINEMATICALLY
CONNECTED CYCLIC WALKING PROPULSORS

¹ Volgograd State Technical University² Keldysh Institute of Applied Mathematics

Drive control methods of a walking mobile robot with cyclic propulsors, along the sides of the body and kinematically connected, are discussed. A comparison of different motion algorithms on a relatively flat surface is given. Variants of remote and remote control systems with frequency control of the electric drive of walking propellers are considered.

Keywords: cyclic walking mechanism, mobile robot, electric drive.

Применение механизмов шагания в качестве движителей часто приводит к использованию избыточного количества двигателей и, как следствие, возможности реализации сложных программных движений [1]. В то же время некоторые типы механизмов шагания могут быть использованы в составе кинематически связанного привода с меньшим количеством двигателей. С этой точки зрения привод мобильных роботов можно разделить на индивидуальный для каждого из звеньев механизма шагания, индивидуальный для каждого из механизмов шагания [2], индивидуальный для каждого из движителей или связанных побортно движителей [3]. Каждый из перечисленных вариантов компоновки корпус-привод-двигатель мобильной робототехнической системы характеризуется различными кинематическими схемами.

Исследования кинематики и динамики шагающих движителей [3, 4] позволяют современным исследователям мобильных роботов сосредоточиться на проблемах управления двигателями мобильного робота. В работе проводится анализ системы управления мобильного

робота с побортно расположенными цикловыми движителями как робототехнической системы корпус-привод-двигатели.

Особенности цикловых движителей различных конструкций широко изучены как отдельно, так и в составе мобильных роботов. Всестороннее изучение теории и проведенные экспериментальные исследования шагающих машин с цикловыми движителями подтвердили возможность практического использования цикловых механизмов. Современные исследования мобильных роботов цикловыми шагающими движителями направлены прежде всего на поиск управления и оцувствления подобными роботами, в том числе на формирование критериев, обеспечивающих эффективное или оптимальное движение мобильных роботов, в частности, в сложных условиях.

Кинематические схемы накладывают на формирование программных движений при планировании движения корпуса дополнительные ограничения. Эти ограничения связаны прежде всего с расположением движителей относительно корпуса (например, отсутствие

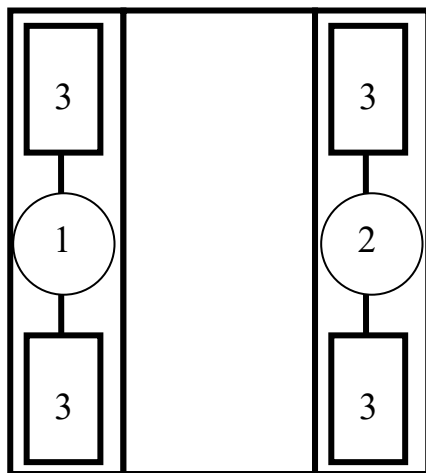
© Шаронов Н. Г., Пряничников В. Е., Коломин Н. В., Ветлицын М. Ю., 2024.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00720, <https://rscf.ru/en/project/23-29-00720/>.

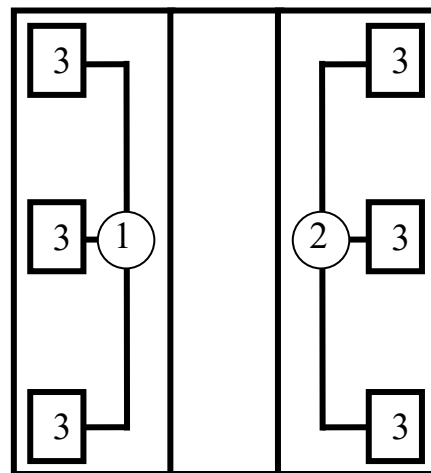
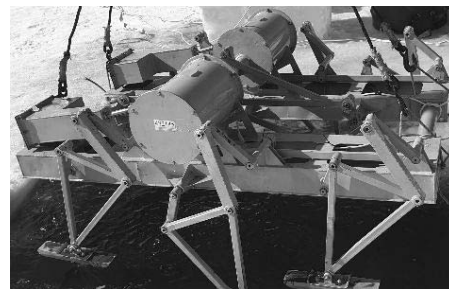
возможности поворота относительно корпуса плоскости шагания). Применение дополнительных кинематических связей уменьшает возможности маневрирования при одновременном снижении количества используемых независимых двигателей, а реализация программных движений корпуса связана с проскальзыванием движителей относительно опорной поверхности.

В работе рассматривается мобильный робот с побортно расположенными механизмами шагания, привод которых осуществляется за счет работы двух побортно расположенных электродвигателей. К подобным мобильным роботам относятся (рис. 1) «Восьминог» (побортно связаны два движителя, каждый из которых представляет собой сдвоенный механизм шагания) и «МАК-1» (побортно связаны три механизма шагания).

Для моделирования кинематики и динамики движения рассматриваемого робота с побортным расположением движителей применена экспериментально проверенная модель динамики плоского движения [3]. Положение робота на плоскости определяется координатами центра масс машины и углом поворота корпуса машины относительно центра масс. Для исследуемых цикловых движителей положения ведущих звеньев механизмов шагания (походка) может быть задана соотношением углов, характеризующих положения ведущих кривошипов. Походку можно описывать комбинацией углов ведущих звеньев шагающих движителей. При наличии кинематических связей движителей по бортам описание управляющих воздействий (походки шагающих движителей) упрощается до комбинации двух углов $\alpha_1 - \alpha_2$ ведущих валов расположенных побортно двигателей.



а



б

Рис. 1. Мобильные роботы «Восьминог» (а) и «МАК-1» (б) с побортным расположением кинематически связанных движителей: 1, 2 – двигатели побортно сгруппированных движителей; 3 – движители

Для изменения скорости относительного движения опорных точек движителей по бортам модуля, и, следовательно, скорости и направления движения машины, необходимо изменение скорости вращения приводов шагающих механизмов на каждом из бортов. Управ-

ление движением робота упрощенно можно выразить в виде зависимости угловой скорости вращения вала каждого из двигателей:

$$\begin{cases} \omega_1 = k_1 \omega, \omega_1 = \dot{\alpha}_1 \\ \omega_2 = k_2 \omega, \omega_2 = \dot{\alpha}_2 \end{cases}, \quad (1)$$

где k_1, k_2 – переменные коэффициенты регулирования; ω – постоянная, характеризующая номинальную скорость вращения двигателя.

Переменные коэффициенты регулирования k_1, k_2 в (1) зависят от системы управления мобильного робота. Как при управлении непосредственно оператором (в зоне видимости или удаленно при телеуправлении), так и при автоматизированном управлении, коэффициенты k_1, k_2 задаются как переменные функции или набором

базовых движений. Под набором базовых движений понимается ограниченный набор типовых соотношений k_1, k_2 , заданных в виде непрерывных функций (при использовании регулируемого привода) или дискретно (k_1, k_2 принимают значения «1», «0», «-1»). Схематичное описание состояния мобильного робота с побортным расположением движителей приведено на рис. 2 и ниже в таблице.

Пример описания состояния мобильного робота с побортным расположением кинематически связанных движителей

«Вперед»	$k_1 = 1$	$k_2 = 1$
«Стоп»	$k_1 = 0$	$k_2 = 0$
«Назад»	$k_1 = -1$	$k_2 = -1$
«Вперед» один борт 2	$k_1 = 0$	$k_2 = 1$
«Вперед» один борт 1	$k_1 = 1$	$k_2 = 0$
«Назад» один борт 2	$k_1 = 0$	$k_2 = -1$
«Назад» один борт 1	$k_1 = -1$	$k_2 = 0$
Разворот «1-2»	$k_1 = -1$	$k_2 = 1$
Разворот «2-1»	$k_1 = 1$	$k_2 = -1$

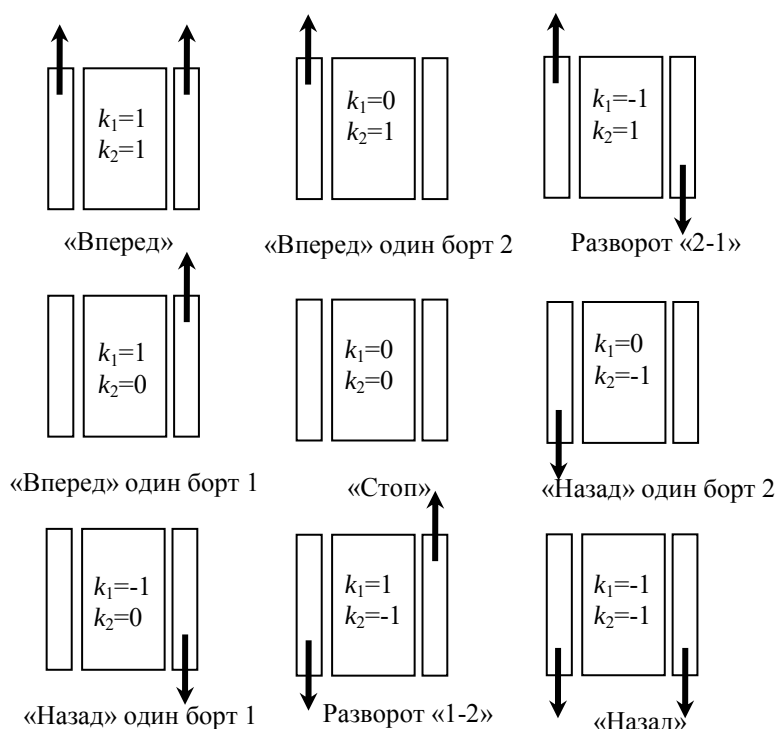


Рис. 2. Схематичное описание состояний мобильного робота с побортным расположением движителей

Контроль программного движения транспортного комплекса осуществляется по системе технического зрения [5] или оператором, опре-

деляющим отклонение между истинным и программным положением транспортного комплекса и его элементов. Например, контроли-

руемыми параметрами могут быть координаты корпуса робота, что обеспечивает соответствие движения робота программному.

Программное движение мобильного робота с поворотным расположением движителей может быть определено различными способами [3, 5]. Например, используя разделение движения на плоскости по реперным точкам x'_K, y'_K (положение которых однозначно задано и считается известным), алгоритм движения от реперной точки к реперной точке может быть задан в виде условия для коэффициентов k_1, k_2 в зависимости от положения реперной точки (ориентира) x_K, y_K относительно робота. Координаты реперной точки на поверхность x'_K, y'_K и относительно робота с учетом угла поворота корпуса ψ робота связаны соотношением

$$\begin{cases} x'_K = x'_C + x_K \cos \psi - y_K \sin \psi \\ y'_K = y'_C + x_K \sin \psi + y_K \cos \psi \end{cases} \quad (2)$$

Угол φ между направлением на реперную точку и продольной строительной осью корпуса робота

$$\varphi = \arctan \frac{x_K}{y_K} \quad (3)$$

Условное разделение плоскости движения относительно корпуса обосновывает алгоритм управления двигателями в зависимости от отклонения φ корпуса робота от курса (по направлению на реперную точку). Возможные значения параметров k_1, k_2 приведены на рис. 3.

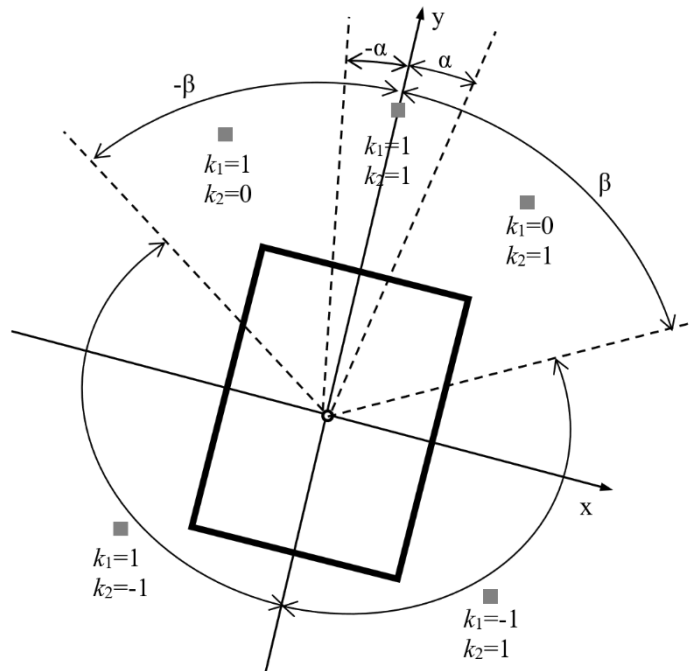


Рис. 3. Схема условного разделения плоскости движения и вариант алгоритма определения коэффициентов регулирования

В зависимости от соотношения значений углов α и β алгоритм управления может существенно меняться. Например, при $\beta=0$ курсовое движение разделяется на два этапа; в начале движения осуществляется разворот на направление к реперной точке, а далее – прямолинейное движение.

Сравнение моделирования динамики плоского движения мобильного робота со сдвоенными цикловыми механизмами шагания по некоторым алгоритмам приведено на рис. 4.

Экспериментальное исследование систем управления движением мобильного робота с поворотным сгруппированными движителями

при подходе к выбранному ориентиру проведено для шагающей машины «Восьминог» и подводного мобильного робота «МАК-1». Местоположение машины относительно выбранных ориентиров определялось расчетом по данным с двух видеокамер [6] или по положению датчика [7].

Практический опыт управления движением шагающей машины в сложных условиях слабо-несущего грунта [3] или под водой [8, 9] продемонстрировал сложность непосредственного управления оператором всеми движителями как при непосредственно визуальном контроле, так и с использованием удаленного видеоконтроля.

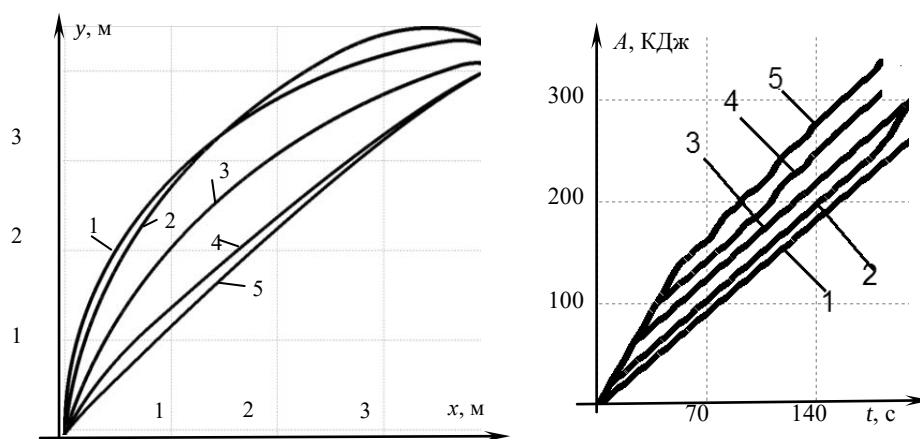


Рис. 4. Траектория движения центра масс корпуса израсходованная на перемещение машины работа при различных значения угла β ($\varphi_0=45^\circ$):
1 – $\beta=10^\circ$; 2 – $\beta=20^\circ$; 3 – $\beta=30^\circ$; 4 – $\beta=40^\circ$; 5 – $\beta=50^\circ$

Использование частотно-регулируемого электропривода позволяет достичь более точного и гибкого управления движением мобильного робота, а также повысить его энергетическую эффективность.

Управление частотными преобразователями оператором осуществляется с помощью выносного пульта (блок управления 1, рис. 5) с кноп-

ками «Пуск/Стоп», «Реверс/Стоп» и потенциометрами R1 и R2 для регулирования частоты вращения. Данная система проста в использовании, но ограничена в возможностях настройки и управления системой без доступа к частотным преобразователям (ЧП1, ЧП2) – требуется наличие проводного подключения к частотным преобразователям.

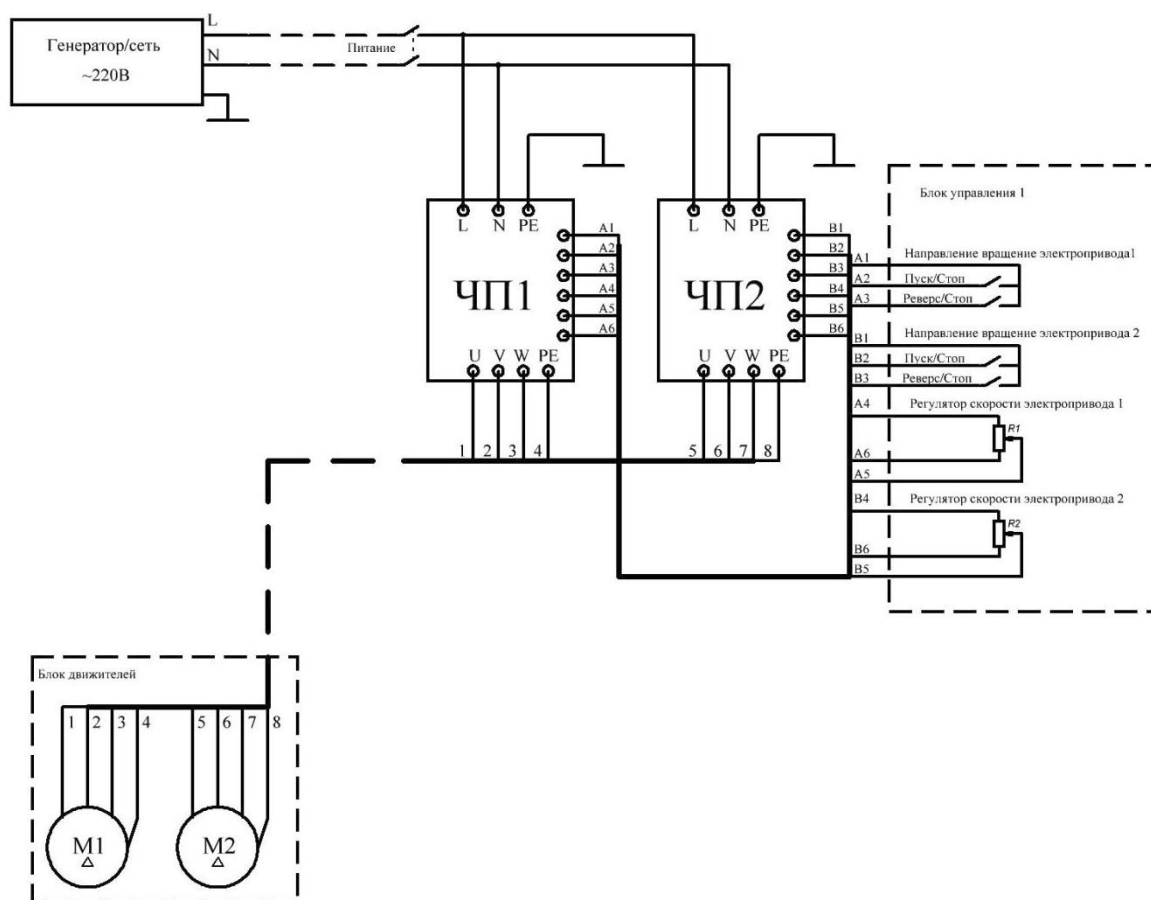


Рис. 5. Схема с использованием проводного пульта управления

Вариант схемы управления мобильным роботом с бортовым объединением механизмов шагания включает персональный компьютер (ПК) и преобразователь сигналов (рис. 6). С помощью ПК и программного обеспечения осуществляется управление частотными преобразователями и получение информации [10]. Достоинствами данного метода являются точность управления и возможность хранения данных. Использование ПК и программного

обеспечения позволяет осуществлять более точное и гибкое управление частотными преобразователями; полученная информация может быть сохранена для дальнейшего анализа и обработки. Недостатками являются сложность установки и настройки программного обеспечения. Для работы системы требуется постоянное подключение к персональному компьютеру, что может создать определенные неудобства при использовании в полевых условиях.

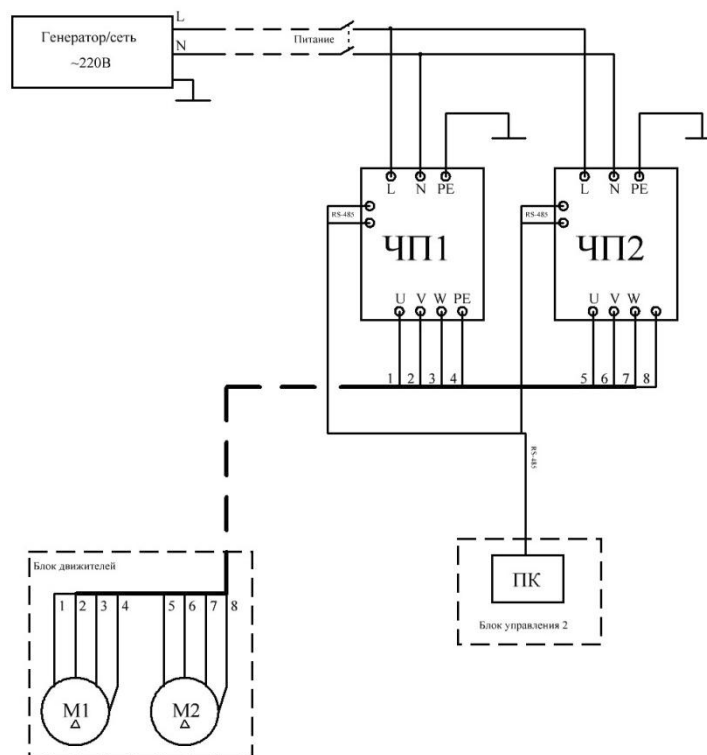


Рис. 6. Схема системы управления через ПК

Дистанционное управление (рис. 7) состоит из двух частей: пульта управления и приемной части, которая подключается к частотным преобразователям и устанавливается вместе с ними в герметичном кейсе. Основу системы управления составляют два микроконтроллера: один – в пульте управления, другой – в приемной части. Информация передается по радиоканалу, и дальность передачи зависит от вида радиопередатчиков и особенностей окружающей среды.

Система позволяет организовать простые движения, такие как движение вперед, поворот на определенный угол, поворот на месте и т. д. Дополнительно возможен сбор данных с ЧП и дополнительных датчиков состояния роботы, для передачи на пульт управления и отображения на дисплее. Система дистанционного

управления может быть уязвима для помех от других радиоустройств, что может привести к сбоям в управлении роботом. Настройка и программирование требуют определенных навыков и знаний в области программирования и электроники. Потеря радиосигнала между пультом и приемником может произойти в результате преград между ними или проблем с электропитанием, что ставит под угрозу безопасность работы робота. Система управления не учитывает возможные динамические перегрузки, возникающие в электродвигателях и ПЧ при движении робота по неорганизованной поверхности при заклинивании, или застревание опор робота и, как следствие, возникновение сверхтоков в системе, что может привести к аварийному отключению частотного преобразователя и потере работоспособности робота [11].

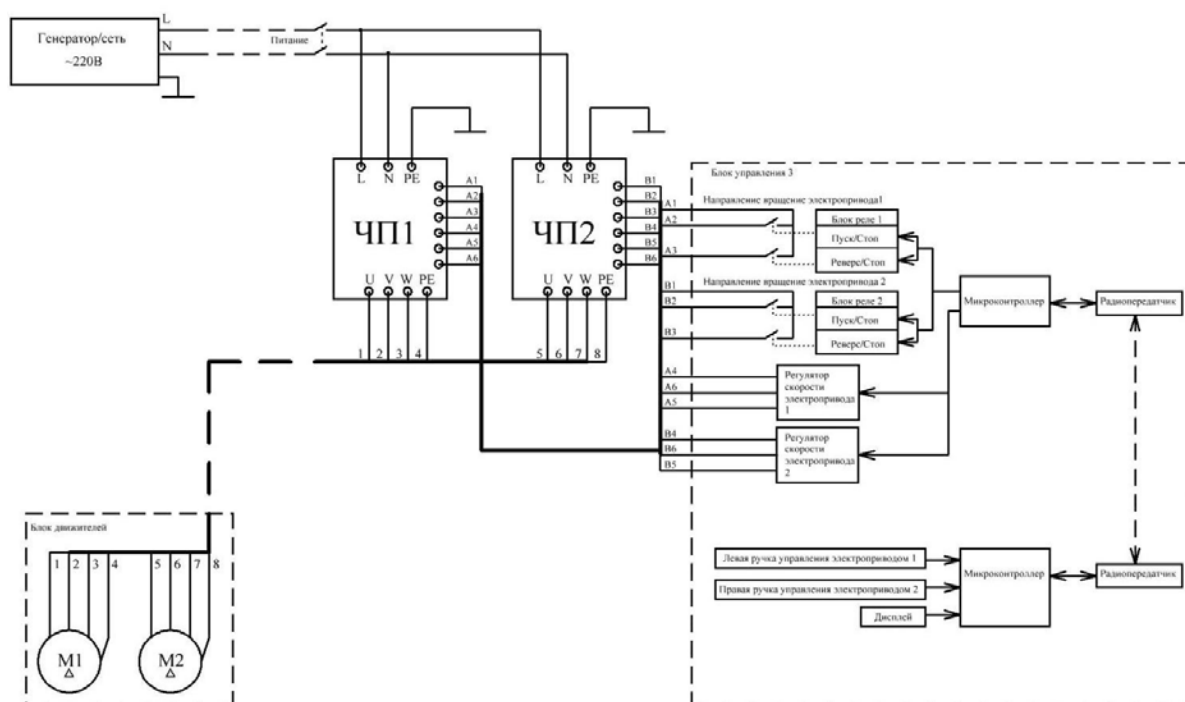


Рис. 7. Схема системы дистанционного управления

Выбор метода управления должен быть обоснован оценкой конкретных потребностей и условий применения. Дистанционное управление с пульта может быть эффективно использовано при требовании простоты, низкой квалификации оператора и стоимости блока управления, тогда как системы управления с использованием компьютера и программного обеспечения, а также дистанционное управление с добавленными функциями программирования могут быть необходимы при востребованной высокой точности, гибкости, возможности адаптации и достаточной квалификации оператора.

Рассмотренные варианты системы управления двигателями мобильных роботов с бортно расположенными цикловыми шагающими двигателями обеспечивают реализацию программного движения корпуса мобильного робота.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павловский, В. Е. О разработках шагающих машин / В. Е. Павловский // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. – 2013. – № 101. – С. 1–32.
2. RHex : A Biologically Inspired Hexapod Runner / R. Altendorfer, N. Moore, H. Komsuolu [et al.] // Autonomous Robots. – 2001. – Vol. 11, No. 3. – P. 207–213.
3. Динамика и управление движением шагающих машин с цикловыми двигателями / Е. С. Брискин, В. В. Жога, В. В. Чернышев, А. В. Малолетов. – М. : Машиностроение, 2009. – 191 с.
4. Голубев, Ю. Ф. Экстремальные локомоторные возможности инсектоморфных роботов / Ю. Ф. Голубев, В. В. Корянов. – М. : Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, 2018. – 212 с.
5. Шаронов, Н. Г. Синтез алгоритма управления движением шагающей машины «Восьминог» в зависимости от параметров локального препятствия / Н. Г. Шаронов // Известия ВолГГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11 (71) / ВолГГТУ. – Волгоград, 2010. – С. 35–40.
6. Определение относительного положения локальных препятствий при удаленном управлении движением шагающей машины / Д. Н. Покровский, А. В. Малолетов, Н. Г. Шаронов, Я. В. Калинин // Известия ВолГГТУ : научный журнал № 2 (157) / ВолГГТУ. – 2015. – С. 184–188.
7. Дистанционные сенсоры в контуре управления сервисных и подводных роботов / В. Е. Пряничников, В. В. Чернышев, Д. А. Воркутов [и др.] // Экстремальная робототехника. – 2021. – № 1 (32). – С. 110–116.
8. Чернышев, В. В. МАК-1 – подводный шагающий робот / В. В. Чернышев, В. В. Арыканцев // Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. – № 2 (7). – С. 45–50.
9. Особенности преодоления уклонов шагающими аппаратами / В. В. Чернышев, В. В. Арыканцев, И. П. Вершинина [и др.] // Робототехника и техническая кибернетика. – 2021. – Т. 9, № 3. – С. 234–240.
10. Супервизорное управление шагающей подводной базой с автономными роботами-спутниками / В. Е. Пряничников, В. В. Чернышев, В. В. Арыканцев [и др.] // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2018. – Т. 16, № 12. – С. 49–56.
11. Ветлицын, М. Ю. Проблемы реализации защит электродвигателей в условиях современного технологического процесса / М. Ю. Ветлицын, Ю. А. Ветлицын // Заваляшинские чтения 23 : Сборник докладов XVIII Международной конференции по электромеханике и робототехнике. – СПб.: СПб ГУАП, 2023. – С. 283–287.