

ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Гансецкий Д.В.

*Государственный пограничный комитет Республики Беларусь, г. Брест, Беларусь,
dmitry.gansetsky@yandex.ru*

Робот – это автоматическая машина, включающая перепрограммируемое устройство управления и другие технические средства, обеспечивающие выполнение тех или иных действий, свойственных человеку в процессе его трудовой деятельности [1].

Целесообразность применения роботов, прежде всего, диктуется интересами человека, его безопасностью и удобством работы.

В настоящее время происходит роботизация буквально всех сфер деятельности человека. Диапазон применения робототехники достаточно широк – роботы применяются на производствах, используются в медицине, исследуют океанские глубины и просторы космоса. Процесс роботизации затронул также и военно-техническую область, где роботы применяются для ведения разведки местности и объектов, обнаружения и уничтожения взрывоопасных предметов, патрулирования участков местности и периметров объектов [2]. Важная роль также отводится роботам, заменяющих человека при выполнении различных задач в условиях радиоактивного заражения. Все эти факторы привели к созданию робототехники для экстремальных ситуаций или «экстремальной робототехники», основу которой составляют мобильные робототехнические комплексы.

Мобильный робототехнический комплекс (МРК) – это дистанционно управляемая автоматическая машина, которая, может самостоятельно передвигаться и перемещаться в пространстве, используя автоматически управляемый привод.

Мобильные робототехнические комплексы классифицируются [1, 3]:

1. по типу применения во внешней среде:

наземные – применяемые исключительно на сухопутной части земной поверхности;

водные – применяемые на водной части земной поверхности, которые в свою очередь подразделяются на подводные и надводные;

воздушные – применяемые в воздушном пространстве;

космические – применяемые в космическом пространстве, которые в свою очередь делятся на свободно летающих роботов (исследуют просторы космоса), роботов обслуживающих космические аппараты (снаружи и внутри) и напланетных роботов, которые исследуют поверхности других планет и их спутников;

2. по широте применения:

универсальные – применяются в основном для выполнения производственных задач с тяжелыми, опасными и вредными условиями труда (химическое производство, металлургия, добыча полезных ископаемых, атомная промышленность и т.д.);

специальные – применяются для проведения спасательных работ при возникновении техногенных и природных аварий и катастроф, для исследования глубин океана и открытого космоса, а также в целях обеспечения национальной безопасности страны (охрана участков границы и особо важных объектов, обезвреживание взрывоопасных предметов, предотвращение террористических актов и т.д.);

3. по ходовой части и способу передвижения [3, 4]:

шагающие – ходовая часть робота реализована в виде ног. Шагающие роботы бывают двуногие и многоногие. Двуногие роботы применяются там, где требуется уподобить робота человеку, их тогда называют человекоподобными или андроидами;

колесные – ходовая часть робота представлена на колесах;

гусеничные – ходовая часть робота представлена на гусеницах;

плавающие – роботы, которые передвигаются на водной поверхности и под водой с использованием гребных винтов и плавников, подражая движениям рыб и другим водным обитателям;

летающие – роботы, которые передвигаются в воздухе с использованием винтов (квадрокоптеры, дроны и т.д.) или используют методы полёта, присущие различным насекомым;

ползающие – роботы, перемещающиеся подобно змеям, червям, слизням и т.п.;

рельсовые (монорельсовые, струнные [5]) – роботы, передвижение которых осуществляется по рельсу, монорельсу или натянутой струне;

комбинированные – роботы, использующие несколько способов и возможностей передвижения (колесно-гусеничные, колесно-шагающие и т.д.);

4. по типу силового привода:

пневматические – принцип работы основан на давлении сжатого воздуха. Устройство: пневмоцилиндр (стопоры с демпферами, ограничители скорости), распределительная система (клапаны), источник сжатого воздуха [6]. Достоинства: высокая скорость срабатывания пневматических исполнительных механизмов; простота и дешевизна конструкции; обычно используется дискретное цикловое управление; работа в широком диапазоне температур. Недостатки: низкая удельная мощность, которая обусловлена малым рабочим давлением; малая жесткость, которая обусловлена сжимаемостью воздуха (из-за малой жесткости привода трудно обеспечить безударную остановку движущихся масс при подходе штока пневмоцилиндра к неподвижному упору, что вызывает необходимость применения гидроамортизаторов);

гидравлические – принцип работы основан на давлении жидкости. Устройство: гидроцилиндр, распределительная система, станция питания, компрессор, охлаждение, расширительный бак, фильтры [6]. Достоинства: высокая энергоемкость; быстродействие; малая инерционность; точное позиционирование; необходимая жесткость статической нагрузочной характеристики благодаря сжимаемости рабочей жидкости; большая грузоподъемность; непрерывное управление (по скорости или позиции). Недостатки: возможность утечки рабочих жидкостей в местах соединений; необходимость применения устройств для охлаждения рабочих жидкостей (теплообменники, вентиляторы), что увеличивает сложность конструкции; невозможность работы в широком диапазоне температур;

электрические – принцип работы основан на преобразовании электрической энергии в механическую. Устройство: электродвигатель, редуктор, источник питания, усилители мощности, датчики. Достоинства: простота регулирования; бесшумность; отсутствие трубопроводов; простота энергоподводов, монтажа и наладки; высокий коэффициент полезного действия; широкий диапазон регулирования по скорости; точное позиционирование; возможность работы в значительном диапазоне изменения момента нагрузки; работа в широком диапазоне температур. Недостатки: сложность применения в пожароопасных зонах и взрывоопасных средах, также при большой влажности (отчасти этот недостаток устраняется выбором специального типа двигателя с высокой степенью защиты); высокая стоимость, так как приобретается механизм уже с двигателем; при длительной непрерывной работе возможен перегрев двигателя и износ трущихся частей; электромагнитное поле может создавать помехи в сетях управления и помехи в проходящих рядом других сетях (например, управления и сигнализации);

комбинированные – объединение нескольких типов приводов для компенсации недостатков робота (пневмогидравлические, пневмоэлектрические, гидроэлектрические привода и т.п.);

5. по массе:

сверхлегкие, массой до 35 кг;

легкие, массой до 150 кг;

средние, массой до 800 кг;

тяжелые, массой более 800 кг.

Назначение и условия эксплуатации, грузоподъемность, требуемые динамические характеристики (быстродействие, точность позиционирования), вид системы управления –

все эти факторы определяют выбор типа привода для МРК. Особенно высокие требования по надежности предъявляются к конструкции привода робота, предназначенного для функционирования в экстремальных условиях.

Привод – это устройство, состоящее из двигателя, элементов управления двигателем и механизма передачи, соединяющего двигатель с рабочим органом [1].

При выборе типа привода МРК рекомендуется учитывать следующие основные требования [1]:

минимальные габаритные параметры;

высокие энергетические показатели (отношение выходной мощности N к массе привода m);

возможность работы в режиме автоматического управления и регулирования;

обеспечение оптимальных законов разгона и торможения при минимальном времени переходных процессов;

осуществление движений исполнительных механизмов с высокими скоростями при низкой погрешности позиционирования;

малую массу элементов привода при номинальном уровне конструкции;

обеспечение безопасности (минимизацию времени торможения, легкость отключения привода и снятия приложенного усилия, блокирование привода при сохранении положения исполнительных механизмов после команды «Стоп»);

возможность встраивания систем охлаждения и терморегулирования для обеспечения приемлемых тепловых режимов работы привода и стабильности его характеристик;

надежность элементов конструкции;

удобство монтажа и наладки, обслуживания и ремонта;

низкую шумность.

Согласно статистике наибольшее применение в современных роботах средней массы находят такие приводы как пневматический – до 20% всего парка роботов, гидропривод составляет около 30%, а электропривод занимает 50%, однако наблюдается устойчивая тенденция к увеличению применения электроприводов в различных видах роботов. Это связано с разработкой высокомоментных и высокоскоростных электродвигателей.

Рассмотрим основные типы электроприводов, применяемых в МРК.

Электроприводом называется электромеханическое устройство, предназначенное для электрификации и автоматизации рабочих процессов [7].

Электропривод с асинхронным двигателем.

Известно, что более простейшим двигателем переменного тока по конструкции и устройству является асинхронный двигатель (рисунок 1).

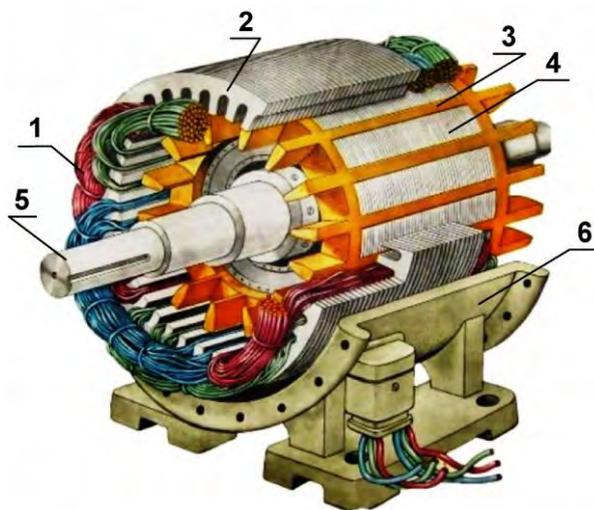


Рисунок 1 – Асинхронный двигатель: 1 – обмотка статора; 2 – сердечник статора; 3 – «беличья клетка»; 4 – сердечник ротора; 5 – вал ротора; 6 – станина

Асинхронный двигатель (АД) – это электрическая асинхронная машина, предназначенная для преобразования электрической энергии переменного тока, который подается на обмотки статора, в механическую энергию, которая возникает в результате вращения вала ротора. Само слово «асинхронный» означает не одновременный. При этом имеется в виду, что у АД частота вращения магнитного поля статора всегда больше частоты вращения ротора. Работают АД от сети переменного тока. АД бывают с короткозамкнутым и фазным ротором. АД с фазным ротором имеют более сложную конструкцию, чем у двигателей с короткозамкнутым ротором, однако обладают лучшими пусковыми и регулировочными свойствами. Однако, несмотря на простоту конструкции, двигатели переменного тока, а в частности АД, практически не используются в МРК. В первую очередь это связано с подключением данных двигателей к сети переменного тока, а МРК в большинстве своем рассчитаны на питание постоянным током от аккумуляторов и батарей. Использование электропривода с АД в МРК является нецелесообразным, как с конструктивной стороны, так и с экономической.

Электроприводы с АД используются в основном в промышленных роботах, где есть возможность подключиться к промышленной сети электроснабжения. В свою очередь данные электроприводы являются глубокорегулируемыми по моменту и имеют систему регулирования с частотно-токовым векторным управлением, обеспечивающую глубокое регулирование по скорости. Система управления является двухконтурной с ПИ-регулятором скорости и трехфазным релейным регулятором тока.

Электропривод с шаговым двигателем.

Шаговый электродвигатель (ШД) – это вращающийся электродвигатель с дискретными угловыми перемещениями ротора, осуществляемыми за счет электрических импульсов сигнала управления (рисунок 2).

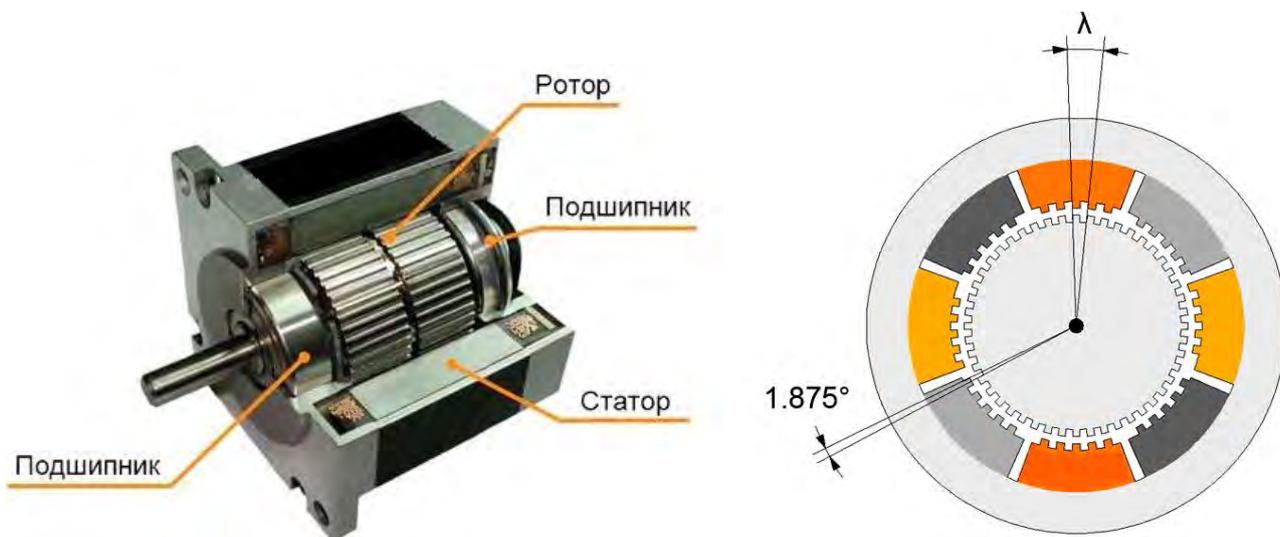


Рисунок 2 – Шаговый двигатель: λ – зубцовое деление; $1,875^\circ$ – шаговый угол

По принципу работы ШД является синхронным двигателем. Отличие заключается в том, что магнитное поле ШД перемещается в воздушном зазоре дискретно, т.е. шагами. Вследствие этого движение ротора состоит из последовательных элементарных шагов. Для получения такого движения обмотки ШД подключаются в определенном порядке к источнику питания [8].

При подаче напряжения на стандартный электрический двигатель его ротор начинает непрерывно вращаться. Определение точной фазы (положения) ротора в этом случае невозможно. В отличие от этого, питание ШД осуществляется серией электрических импульсов, подаваемых на обмотки двигателя. Каждый импульс, поданный на обмотки,

поворачивает ротор на строго определенный угол. Такой поворот называется «шагом», отсюда двигатель получил название шагового.

ШД подразделяются: 1. по принципу действия на три типа: реактивный; с постоянными магнитами; гибридный; 2. по числу фаз – обмоток управления на: однофазные; двухфазные; многофазные; 3. по числу пакетов стали магнитопровода на: однопакетные; двухпакетные; многопакетные; 4. по способу фиксации ротора при обесточенных обмотках управления: с внутренней фиксацией; с внешней фиксацией [8].

Не существует единой величины шага для ШД. Выпускаются устройства с различными углами поворота на один шаг (импульс). Номинальная величина такого шага зависит от характера применения двигателя. Величины углов поворота обязательно указаны в спецификации устройства. Можно найти ШД с углами поворота от долей градуса (например, $0,72^\circ$) до десятков градусов (например, $22,5^\circ$).

Уникальность шаговых двигателей в том, что ими можно управлять с помощью цифровых устройств. Такие двигатели могут осуществлять повороты на точно заданный угол. Это свойство делает шаговые двигатели идеальными для задач линейного и кругового позиционирования. Широкое использование шаговых двигателей в промышленности обуславливает широкий ассортимент моделей по форме, размерам и иным свойствам. ШД отличаются своим многообразием конструктивных решений и способов управления. Они широко применяются в качестве исполнительных элементов рабочих органов механизмов, которые должны совершать строго дозированные перемещения (электропривод стрелки часов, нажимные устройства прокатных станков, установки для выращивания кристаллов, управление отдельными механизмами ядерного реактора, управление кареткой печатного принтера, привод CD/DVD-дисководов и т.п.).

В МРК ШД применяются в основном также в исполнительных механизмах, т.к. применять их в качестве силового привода шасси нецелесообразно из-за малой мощности. Например, в американской межпланетной станции «Mariner» четырехфазные ШД с постоянными магнитами с углом шага в 90° использовались для поворота телевизионных камер и ультрафиолетовых спектрометров. Применение электропривода с ШД больше всего подойдет для сверхлегких мобильных роботов, например робота следящего за линией либо решающего лабиринты.

Электропривод с двигателем постоянного тока.

Электродвигатель постоянного тока – электрическая машина постоянного тока, преобразующая электрическую энергию постоянного тока в механическую энергию.

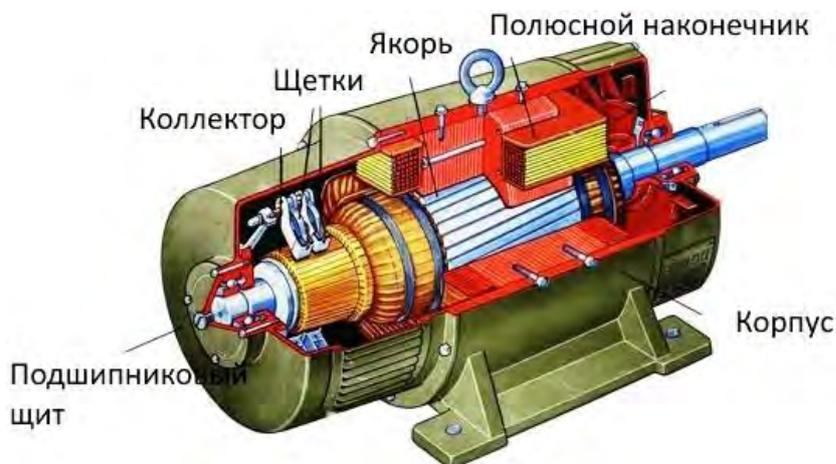


Рисунок 3 – Конструкция двигателя постоянного тока

ДПТ (рисунок 3) по конструкции подобны синхронным двигателям переменного тока, с разницей в типе тока. Главной обмоткой двигателя служит якорь, на который подается питание через коллектор и щеточный механизм. Он совершает вращательное движение в

магнитном поле, образованном полюсами статора (корпуса двигателя). Якорь изготавливается из нескольких обмоток, уложенных в его пазах, и закрепленных там специальным эпоксидным составом. Статор может состоять из обмоток возбуждения или из постоянных магнитов. В маломощных двигателях используют постоянные магниты, а в двигателях с повышенной мощностью статор снабжен обмотками возбуждения. Статор с торцов закрыт крышками со встроенными в них подшипниками, служащими для вращения вала якоря. На одном конце этого вала закреплен охлаждающий вентилятор, который создает напор воздуха и прогоняет его по внутренней части двигателя во время работы.

Принцип действия такого двигателя основывается на законе Ампера. При размещении проволочной рамки в магнитном поле, она будет вращаться. Проходящий по ней ток создает вокруг себя магнитное поле, взаимодействующее с внешним магнитным полем, что приводит к вращению рамки. В современной конструкции ДПТ роль рамки играет якорь с обмотками. На них подается ток, в результате вокруг якоря создается магнитное поле, которое приводит его во вращательное движение.

Выводы обмоток якоря объединены в один узел, называемый коллектором, выполненным в виде кольца из ламелей, закрепленных на валу якоря. При вращении вала щетки по очереди подают питание на обмотки якоря через ламели коллектора. В результате вал двигателя вращается с равномерной скоростью. Чем больше обмоток имеет якорь, тем равномернее будет работать двигатель.

Щеточный узел является наиболее уязвимым механизмом в конструкции двигателя. Во время работы медно-графитовые щетки притираются к коллектору, повторяя его форму, и с постоянным усилием прижимаются к нему. В процессе эксплуатации щетки изнашиваются, а токопроводящая пыль, являющаяся продуктом этого износа, оседает на деталях двигателя.

Щетки требуют периодического их перемещения в пазах и продувки воздухом, так как от накопившейся пыли они могут застрять в направляющих пазах. Это приведет к зависанию щеток над коллектором и нарушению работы двигателя. Щетки периодически требуют замены из-за их износа. В месте контакта коллектора со щетками также происходит износ коллектора. Поэтому при износе якорь снимают и на токарном станке протачивают коллектор. После проточки коллектора изоляция, находящаяся между ламелями коллектора стачивается на небольшую глубину, чтобы она не разрушала щетки, так как ее прочность значительно превышает прочность щеток.

Из-за наличия щеточно-коллекторного узла наибольшее применение ДПТ находят в промышленных роботах, чем в МРК. Они в основном являются малоинерционными и высокомоментными с постоянными магнитами, что позволяет значительно повысить удельную мощность электропривода и получить высокую кратность тока и момента по отношению к номинальным.

Такой тип ДПТ как сервомотор применяется в основном в небольших МРК, как и ШД. Сервомотор представляет собой ДПТ, снабженный редуктором и системой обратной связи контроля положения. Может использоваться для управления дополнительным оборудованием МРК.

Электропривод с вентильным двигателем.

Электродвигатели, работающие от постоянного тока, обычно обладают более высокими экономическими и техническими характеристиками, по сравнению с двигателями переменного тока. Единственным серьезным недостатком является наличие щеточного механизма, существенно понижающего надежность всей конструкции, повышающего инерционность ротора, взрывоопасность двигателя, а также возможность создания радиопомех. Поэтому были созданы бесконтактные двигатели, работающие от постоянного тока, которые получили название вентильные двигатели. Создание такого нового устройства стало возможным, благодаря появлению полупроводников. Щеточный механизм в этой конструкции заменен коммутатором на основе полупроводниковых элементов. Якорь является неподвижным элементом, а на роторе закреплены постоянные магниты.

Вентильный двигатель (ВД) представляет собой синхронный двигатель, регулируемый путем изменения частоты с самосинхронизацией [8].

ВД постоянного тока представляет собой электромеханическую систему, состоящую из трех основных элементов: электрической машины для привода в действие исполнительного механизма; датчика положения ротора (ДПР) (на основе датчика Холла или фотоэлектрического датчика), выполненного в одном корпусе с двигателем и вырабатывающего сигналы управления, которые определяют последовательность подключения обмоток фаз к источнику питания; бесконтактного (полупроводникового) коммутатора, который по сигналам ДПР осуществляет подключение (коммутацию) обмоток двигателя. В результате получается мехатронное устройство, которое позволяет сделать корпус более компактным, избавиться от дополнительных деталей, лишних преобразователей, а соответственно сделать весь привод механизма более надежным.

ВД (рисунок 4) представляет собой измененный вариант коллекторного мотора постоянного тока. Мотор имеет индуктор, расположенный на роторе, обмотка якоря находится на статоре. Электричество подается управляющими командами на статорные обмотки, в зависимости от угла поворота ротора, который определяется встроенными датчиками Холла.



Рисунок 4 – Конструкция вентильного двигателя

Дополнительно в ВД может встраиваться термодатчик и тормозной механизм. Тахогенератор используется в случае работы мотора в режиме стабилизации скорости с большой точностью. Термодатчик служит для предохранения обмоток от перегрева, и включает в себя несколько позисторов, соединенных друг с другом между собой последовательно. Позисторы-резисторы, сопротивление которых зависит от температуры, чем больше температура, тем выше их сопротивление.

Достоинства ВД: небольшие потери энергии, благодаря малому магнитному сопротивлению; высокая безопасность при работе на максимальных нагрузках; широкий интервал рабочих скоростей; высокая точность работы и динамика; плавное переключение скоростей; отсутствие щеточно-коллекторного узла; возможность применения в агрессивной среде; длительный срок службы; высокая надежность.

К недостаткам ВД можно отнести сложность системы управления и их более высокую стоимость.

Благодаря высокой надёжности и хорошей управляемости, вентильные двигатели применяются в широком спектре приложений: от компьютерных вентиляторов и CD/DVD-приводов до роботов и космических ракет.

Широкое применение ВД нашли в промышленности, особенно в системах регулирования скорости с большим диапазоном и высоким темпом пусков, остановок и

реверса; авиационной технике, автомобильном машиностроении, биомедицинской аппаратуре, бытовой технике и пр. Также, этот тип двигателей часто используется в двигателях квадрокоптеров.

Заключение.

В данной работе:

1. произведена классификация МРК исходя из области их применения и требований, предъявляемых к ним;
2. приведены основные требования для выбора типа привода МРК;
3. проведен анализ и рассмотрены основные типы электроприводов, применяемых как в МРК, так и в промышленных робототехнических комплексах;
4. на основании проведенного анализа, можно сделать вывод, что более рациональным и эффективным типом электропривода для МРК будет являться электропривод вентильного двигателя с постоянными магнитами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов А.А. Основы робототехники: учебное пособие / А.А. Иванов. – М.: ФОРУМ, 2012. – 224 с.
2. Гансецкий Д.В. Теория применения автоматизированного дистанционно-управляемого мобильного робота в охране границы / Д.В. Гансецкий // Сборник тезисов докладов 7-й респ. научн.-практ. конф. ГУО «Институт пограничной службы Республики Беларусь». Часть 2. – Минск: ГУО «ИПС РБ», 2017. – С. 110 – 112.
3. Юревич Е.И. Основы робототехники / Е.И. Юревич. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
4. Момот М.В. Мобильные роботы на базе Arduino / М.В. Момот. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2018. – 336 с.
5. Гансецкий Д.В. Автоматизированный струнный робототехнический комплекс / Д.В. Гансецкий // Материалы Международной военн.-научн. конф. профессорско-преподавательского состава, адъюнктов, аспирантов и магистрантов «Перспективы развития вооружения и военной техники. Совершенствование теории и практики боевых действий. Инновации в инженерном военном образовании». Часть 1. – Минск: БНТУ, 4 февраля 2016. – С.76 – 78.
6. Персиянов В.А., Шапошникова Д.Т. Приводы мобильных роботов / В.А. Персиянов, Д.Т. Шапошникова // Научное сообщество студентов XXI столетия. Естественные науки: сб. ст. по мат. LXV междунар. студ. науч.-практ. конф. – 2019. – № 6 (64).
7. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники: учебное пособие / И.А. Данилов, П.М. Иванов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1989. – 752 с.
8. Гульков Г.И., Пеиренко Ю.Н., Раткевич Е.П., Симоненкова О.Л. Системы автоматизированного управления электроприводами: учебное пособие / Г.И. Гульков, Ю.Н. Петренко, Е.П. Раткевич, О.Л. Симоненкова. – 2-е изд., испр. и доп. – Минск: Новое знание, 2007. – 394 с.