

Э.А. АКОПЯН, Г.И. ПИТКЕВИЧ

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ БОЛЬШЕГРУЗНОГО АВТОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Рассматриваются особенности применения асинхронного тягового электропривода в трансмиссии многоосных пневмоколесных платформ. Приводится структурная схема адаптивного электропривода с цифровым управлением момента, исследованы его статический и динамический режимы работы.

Ключевые слова: активное колесо, регулируемый соленоид, электрический дифференциал, векторное управление, прямое управление моментом, логический автомат.

Строительство и реконструкция промышленных предприятий тесно связаны с применением нового, более производительного оборудования и технологических установок, которые отличаются повышенными габаритными размерами и весовыми показателями. С другой стороны, повышение производительности действующих технологических установок зачастую связано с увеличением их размеров и массы. Одновременно повышаются требования к качеству и сроку их монтажа. Одним из возможных путей сокращения последнего является более высокая заводская готовность изделия, вплоть до полной заводской сборки. Кроме того, существует ряд изделий, которые могут доставляться к месту монтажа только в полностью готовом виде (трансформаторы, барокамеры высокого давления и т.д.). Поэтому для перевозки крупногабаритных, неделимых грузов приходится применять специальные автотранспортные средства (АТС), представляющие собой полноприводные пневмоколесные платформы. Поскольку такие платформы способны транспортировать груз в том числе и по автомобильной магистрали, то, во избежание деформации дорожного покрытия, они изготавливаются многоколесными и полноприводными, благодаря чему обеспечивается равномерное распределение нагрузки по ведущим осям.

Указанные конструктивные особенности обуславливают необходимость обеспечения согласованной работы ведущих мотор-колесных пар и системы рулевого управления ими. Однако поворот управляемых колес практически невозможно осуществлять традиционными методами, т.е. с помощью поперечных рулевых тяг. Для этого используют гидростатический силовой привод, в котором применяются прецизионные пары «цилиндр-поршень». Необходимо отметить, что такая конструкция получается дорогой и сложной и требует постоянного контроля его состояния. По этой причине в большинстве случаев применяют гидрообъемный или электрический привод с индивидуальным силовым преобразователем.

Традиционные гидрообъемные трансмиссии состоят из первичного двигателя (двигатель внутреннего сгорания), который приводит во вращение гидронасосы. Регулирование крутящим моментом гидродвигателя осуществляется с помощью регулируемых соленоидов. Однако высокое давление, вырабатываемое гидронасосом (до 100 МПа), может привести к утечке рабочей жидкости из зоны нагнетания в зону разряжения (что строго недопустимо) и аварийной остановке его работы, вследствие чего сокращается число активных колес трансмиссии, а следовательно, и снижению силы тяги АТС. Для предотвращения утечки приходится устанавливать различные датчики (давления, утечки и температуры), с помощью которых контролируется состояние всей гидросистемы, что, в свою очередь, приводит к резкому усложнению и удорожанию системы управления. Это ограничивает применение гидрообъемной трансмиссии в крупногабаритных АТС, а порой делает ее даже невозможным. В связи с этим электрическая трансмиссия является предпочтительной, а в некоторых типах транспортных средств – единственной возможной [1]. В то же время замена двигателей постоянного тока на асинхронные и оснащение тягового электропривода современными компьютеризированными системами управления позволили в значительной степени повысить такие показатели, как маневренность, надежность и долговечность трансмиссии в целом. Однако разработка и создание подобных систем связаны с необходимостью решения целого ряда задач и, в первую очередь, детального исследования динамики движения большегрузного транспортного средства по криволинейной траектории. Сложность ее исследования обусловлена перераспределением скоростей качения колес, а также возникновением боковых сил увода, порождающих, тем самым, существенный дисбаланс крутящих моментов мотор-колесных пар. Решение этих проблем лежит в русле применения современных методов исследования и использования в системах питания и управления силовой электронной (транзисторной) преобразовательной техники с цифровым управлением, что дает возможность построения высокоэффективных, экономичных и надежных тяговых асинхронных электроприводов АТС большой и особо большой грузоподъемности [2].

Современные силовые преобразователи с цифровым управлением позволяют реализовывать различные законы управления тяговым электроприводом, которые закладываются в виде программного обеспечения в микропроцессорном модуле управления. В связи с этим при разработке адаптивных систем управления тяговым электроприводом наибольший интерес представляет вопрос их алгоритмизации.

В отличие от других транспортных средств, радиусы поворота самоходных платформ варьируются в широких пределах. Помимо этого, такие средства способны совершать так называемые "карусельные движения" т.е. круговые движения вокруг произвольно выбранного полюса поворота. Такой поворот обеспечивается с помощью гидравлической или электрической рулевой системы, которая управляет угловым положением мотор-колесной пары в зависимости от координат заданного полюса поворота. При этом скорость качения i -го колеса будет соответствовать следующему выражению:

$$n_i = n_a \frac{R \pm B/2}{R \cdot \cos(\Theta_i)} \quad (1)$$

где R - радиус поворота геометрического центра базы АТС; B - ширина базы АТС; Θ_i - угловое положение мотор-колеса относительно продольной оси базы; n_a - скорость качения колеса при прямолинейном движении, знак «+» относится к колесам набегающего борта базы АТС, а знак «-» к колесам противоположного борта.

Из приведенного выражения следует, что при повороте АТС скорость качения мотор-колес набегающего борта будет значительно отличаться от скоростей колес забегающего борта. Поскольку при криволинейном движении АТС происходит принудительное изменение скоростей колес, то в зависимости от особенностей тяговых двигателей это изменение может значительно повлиять на тяговые усилия ведущих колес. В частности, если тяговым двигателем служит асинхронный электродвигатель (АД), то изменение скорости вращения ротора приводит к резкому изменению его крутящего момента, а следовательно, и тягового усилия ведущего колеса. Отсюда следует, что, согласно выражению (1), при повороте платформы тяговые двигатели колесных пар забегающего борта перегружаются, а двигатели набегающего борта недогружаются и могут перейти в генераторный (тормозной) режим, увеличив тем самым суммарную силу сопротивления движению АТС. Причиной этому является отсутствие электрического дифференциала между соосными колесами. В электрических трансмиссиях подобная проблема в значительной степени решается последовательным соединением якорных цепей тяговых двигателей. В случае применения в трансмиссии асинхронных двигателей их равномерная загрузка возможна только при условии согласованного управления (это касается и тяговых двигателей многоосных, многоопорных транспортных систем со всеми ведущими осями). В этом случае, с учетом возрастающего количества ведущих осей, целесообразно перейти к индивидуальному управлению каждым из мотор-колес, поскольку при большом числе ведущих колес формирование их крутящего момента от единой энергоустановки становится затруднительным.

Одним из путей совершенствования системы управления трансмиссией АТС является применение современных аппаратно-программных систем, которые дают широкие возможности в управлении двигателями в зависимости от предъявляемых технических требований [3].

Многоколесная электротрансмиссия, в отличие от традиционных механических трансмиссий, предъявляет особые требования к силовому приводу. Эти требования, в первую очередь, связаны с формированием крутящего момента ведущих мотор-колес. В обычном автомобиле с механической трансмиссией постоянство механической мощности каждого ведущего колеса обеспечивается независимо от скорости его качения. Это происходит за счет равнозначного изменения крутящих моментов и скоростей колес, осуществляемого механическим дифференциалом. Однако для многоколесных платформ большой грузоподъемности требуется постоянство крутящих моментов активных колес, что необходимо для равномерного распределения механических нагрузок по осям в отдельных частях платформы в процессе движения. Для обеспечения стабильной работы асинхронного

двигателя в таких системах необходимо создать систему питания и управления, состоящую из силового преобразователя и аппаратно-программных средств управления.

В настоящей статье рассматриваются особенности применения асинхронного тягового электропривода в транспортных системах с *векторным управлением* АД [4]. Как известно, этот метод управления основан на использовании математической модели АД, в которой описываются все его динамические процессы. До последнего десятилетия этот метод считался практически нереализуемым и использовался в качестве метода анализа АД. Однако благодаря современным достижениям электронной преобразовательной техники и аппаратно-программных средств появилась возможность реализовать его в том числе и в транспортных системах на основе так называемого метода "прямого управления моментом" [5].

В отличие от скалярного управления, здесь регулируется динамический момент АД путем его прямого вычисления в модели согласно следующему выражению:

$$M = \frac{3}{2} Z_p \frac{L_m}{L_r} \Psi_r I_q, \quad (2)$$

где Ψ_r - потокосцепление ротора; I_q - активный компонент тока статора; L_m и L_r - взаимная индуктивность и индуктивность ротора соответственно; Z_p - число пар полюсов. Также вычисляется и потокосцепление Ψ_r :

$$\Psi_r = \frac{L_m I_d}{T_r s + 1}, \quad (3)$$

где I_d - реактивный компонент тока статора; T_r - постоянная времени обмотки ротора; $s = d/dt$.

Компоненты тока статора I_q и I_d определяются следующим образом:

$$I_q = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[i_B \sin(\gamma_\psi + \frac{7}{6}\pi) + i_C \sin(\gamma_\psi + \frac{5}{6}\pi) \right], \quad (4)$$

$$I_d = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[i_B \sin(\gamma_\psi + \frac{5}{3}\pi) + i_C \sin(\gamma_\psi + \frac{4}{3}\pi) \right], \quad (5)$$

где i_B , i_C - мгновенные значения тока фаз В и С, которые измеряются датчиками тока; γ_ψ - текущий угол положения потокосцепления ротора.

Метод управления АД, рассматриваемый в этой статье, является модернизированным вариантом метода прямого управления моментом. Этот метод обеспечивает два режима работы АД: режим постоянного момента и режим постоянства механической мощности. Причем эти режимы переключаются автоматически в зависимости от условий движения АТС.

Математическая модель асинхронного двигателя составлена на основе уравнений Парка-Горева для двумерной системы координат (d, q) , которая ориентирована по вектору потокосцепления ротора. Для рассматриваемого метода выражения, определяющие значения частоты (ω_r) и амплитуды (U_s) напряжения статора, имеют следующий вид:

$$\frac{dU_s}{dt} = U^* + I_s R_s - k(\Theta)M + k_d \omega_f, \quad (6)$$

$$\omega_f = \omega_0 + k_\omega \omega_r,$$

где U^* - задающий сигнал крутящего момента; R_s , I_s - активное сопротивление и ток обмотки статора соответственно; ω_0 - внутреннее задание частоты; ω_r - частота вращения ротора; k_T , k_ω - коэффициенты обратных связей момента и скорости соответственно, а $k(\Theta)$ учитывает влияние углового положения мотор-колеса на скорость его качения согласно выражению (1).

Вышеприведенным выражениям соответствует адаптивная система управления тяговым асинхронным приводом, функциональная схема которой показана на рис.1.

Схема состоит из автономного инвертора (АИН) на IGBT силовых транзисторах, блока модели двигателя 3, блока векторного модулятора 1, быстродействующего логического автомата 2, цифрового ПИД регулятора и импульсного датчика скорости. Как и в традиционных системах векторного управления АД, приведенная схема состоит из двух контуров регулирования - контура момента и контура скорости. Важно отметить, что контур момента является наиболее сложным, он состоит из трех различных цепей обратной связи.

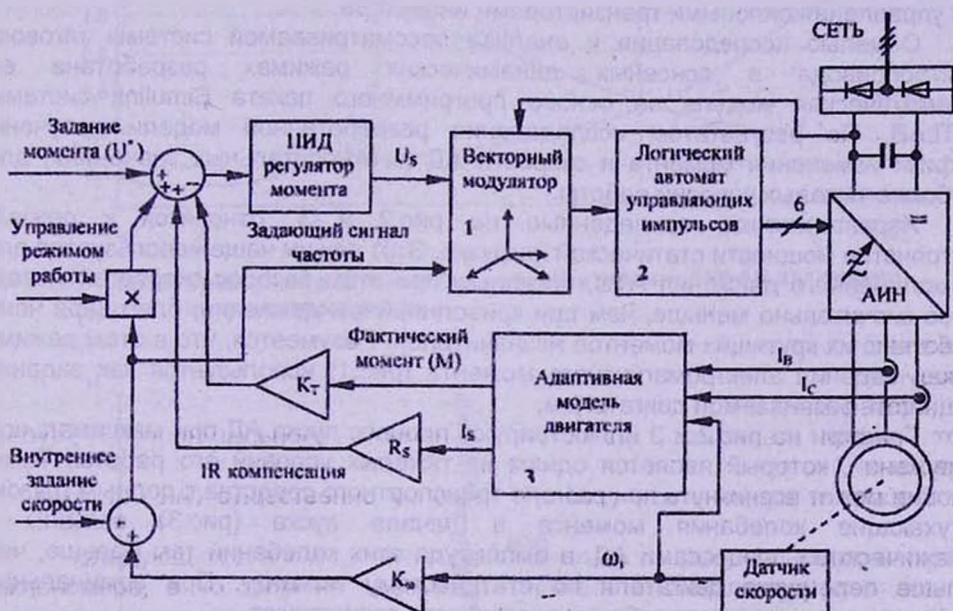


Рис.1. Функциональная схема системы тягового асинхронного электропривода

В адаптивной модели двигателя вычисляются фактический момент M и суммарный ток статора I_s , с помощью которых образуются внутренние обратные связи контура регулирования моментом. Обратная связь по току статора (I_s) используется для компенсации омических потерь в обмотке. Внешняя обратная

связь по скорости АД используется для управления режимами работы привода. В частности, при отсутствии этой обратной связи привод работает в режиме постоянства мощности. Цифровой регулятор контура момента обладает пропорционально-интегрирующим и дифференцирующим (ПИД) свойствами с возможностью настройки его параметров, благодаря которому контур легко настраивается на технический оптимум.

Как известно, скорость движения АТС в основном обусловлена развиваемой трансмиссией силой тяги и условиями движения. Следовательно, в систему управления тяговым приводом нет необходимости внедрения контура регулирования скорости. Именно поэтому в рассматриваемой системе асинхронного электропривода (рис.1) в контуре скорости внешний задающий сигнал отсутствует, а обратная связь - положительная. При этом скорость вращения двигателя будет зависеть от значений задания момента и механической нагрузки на валу. Кроме того, контур скорости обеспечивает полную компенсацию скольжения АД во всем рабочем диапазоне скорости.

Блоки векторного модулятора 1 и логического автомата 2 (рис.1) являются неотъемлемыми частями системы векторного управления АД. Они используются для управления вектором напряжения статора АД по сигналам напряжения U_s поступающего из ПИД регулятора, и задающей частоты. Логический автомат преобразует вектор напряжения в импульсные сигналы, которые используются для управления силовыми транзисторами инвертора.

С целью исследования и анализа рассматриваемой системы тягового электропривода в основных динамических режимах разработана ее математическая модель на основе программного пакета Simulink системы MATLAB. По результатам исследования разработанной модели получены графики изменения момента и скорости АД (в относительных значениях) для наиболее тяжелых условий работы.

Характеристики, приведенные на рис.2 и 3, относятся к режиму постоянства мощности статической нагрузки. Этот режим чаще используется для прямолинейного движения АТС, поскольку при этом разброс скоростей мотор-колес значительно меньше, чем при криволинейном движении, благодаря чему дисбаланс их крутящих моментов незначителен. Разумеется, что в этом режиме сигнал задания электромагнитного момента (рис.1) используется как задание мощности, развиваемой двигателем.

Графики на рис.2 и 3 иллюстрируют процесс пуска АД при максимальном нагружении, который является одним из тяжелых условий его работы. Такое условие может возникнуть при разгоне транспортного средства с полным грузом. Затухающие колебания момента в начале пуска (рис.3) связаны с динамическими процессами АД, а амплитуда этих колебаний тем больше, чем больше перегрузка двигателя по статическому моменту. При номинальных значениях момента эти колебания практически отсутствуют.

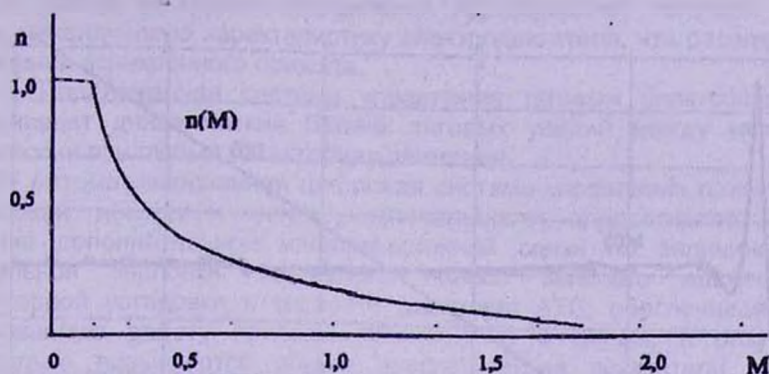


Рис.2. Механическая характеристика АД для режима постоянной мощности

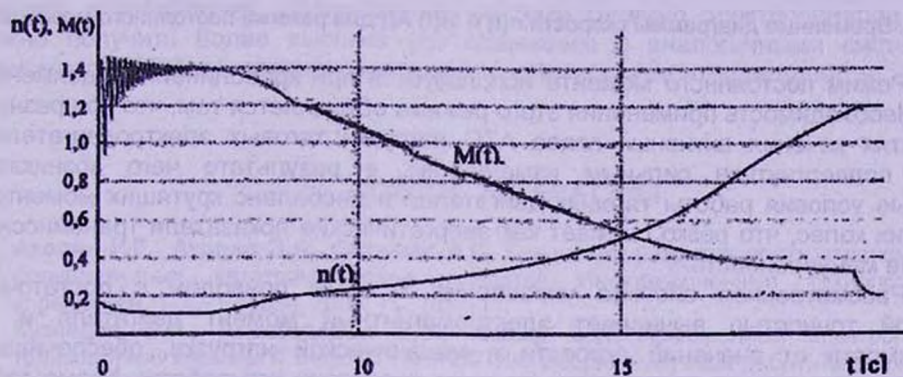


Рис.3. Временные диаграммы скорости $n(t)$ и момента $M(t)$ АД для режима постоянства мощности

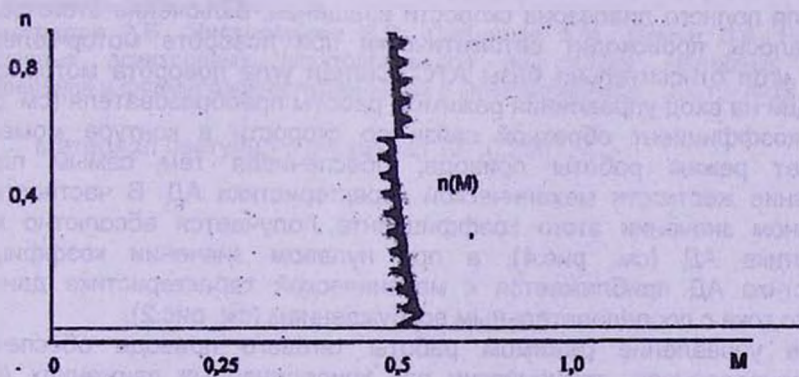


Рис.4. Механическая характеристика АД для режима постоянного момента

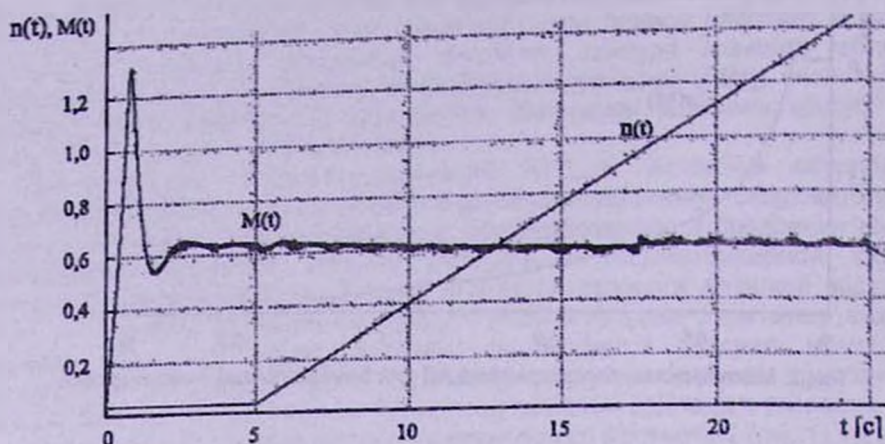


Рис.5. Временные диаграммы скорости $n(t)$ и $M(t)$ АД для режима постоянного момента

Режим постоянного момента используется при криволинейном движении АТС. Необходимость применения этого режима объясняется тем, что при разных скоростях качения активных колес АТС нагрузки тяговых электродвигателей могут подвергнуться сильным изменениям, в результате чего возникают тяжелые условия работы тяговых двигателей и дисбаланс крутящих моментов ведущих колес, что резко снижает как энергетические показатели трансмиссии, так и ее маневренность.

Рассмотренная система управления тяговым приводом с достаточно высокой точностью вычисляет электромагнитный момент двигателя и, в зависимости от значений скорости и механической нагрузки, обеспечивает постоянство момента практически во всем диапазоне его работы. Кроме того, высокое быстродействие цифровой системы управления обеспечивает стабильную работу двигателя при динамической нагрузке.

Графики на рис.4 и 5 иллюстрируют работу привода в режиме постоянного момента для полного диапазона скорости вращения. Включение этого режима, как отмечалось, происходит автоматически при повороте мотор-колеса на некоторый угол относительно базы АТС. Сигнал угла поворота мотор-колеса, поступающий на вход управления режимом работы преобразователя (см. рис.1), изменяет коэффициент обратной связи по скорости в контуре момента и переключает режим работы привода, обеспечивая тем самым плавное регулирование жесткости механической характеристики АД. В частности, при максимальном значении этого коэффициента получается абсолютно мягкая характеристика АД (см. рис.4), а при нулевом значении коэффициента характеристика АД приближается к механической характеристике двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением (см. рис.2).

Такое управление режимом работы тягового привода обеспечивает высокую маневренность трансмиссии при криволинейных движениях АТС, а также полное использование тяговых электродвигателей по мощности.

Из анализа рассмотренной системы можно сделать следующие выводы.

1. Метод векторного управления АД позволяет получить практически любую механическую характеристику электродвигателя, что расширяет область применения асинхронного привода.

2. Предложенная система управления тяговым электроприводом АТС обеспечивает динамический баланс тяговых усилий между мотор-колесами трансмиссии при любых траекториях движения.

3. Автоматизированная цифровая система управления приводом, за счет ее высокой гибкости и многофункциональности, предоставляет возможность создания дополнительной информационной связи по величине изменения дроссельной заслонки топливного насоса высокого давления дизель-генераторной установки и скорости движения АТС, обеспечивая тем самым согласованную работу привода трансмиссии в целом, в результате чего значительно повышаются общие энергетические показатели транспортного средства.

4. Применением современных сетевых средств управления и диагностики неисправностей мотор-колесных пар с индивидуальными электронными блоками питания и управления, образующими систему тягового электропривода АТС, можно получить более высокие (по сравнению с аналогичными системами трансмиссий АТС) показатели надежности работы и ремонтнопригодности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акопян Р.Е., Акопян Э.А., Овсепян В.С. Тенденции развития электротрансмиссий большегрузных автотранспортных средств// Информационные технологии и управление, 1-1. - Ереван, 2003. - С.101-111.
2. Кузнецов Б.И., Александров Е.Е., Можар В.М. Асинхронный электропривод транспортной машины // Вестник НТУ «ХПИ»: Сборник научных работ.-Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. - Т.1, №10. - С.184-185.
3. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических процессов. - М.: Академия, 2004. - 396 с.
4. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. - М.: Академия, 2006. - 272 с.
5. Виноградов А.Б., Чистосердов В.Л., Сибирцев А.Н., Монов Д.А. Новая серия цифровых асинхронных электроприводов на основе векторных принципов управления и формирования переменных // Электротехника. - 2001. - №12. - С. 25-30.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 12.10.2007.

Է.Ա. ՀԱԿՈԲՅԱՆ, Գ.Ի. ՊԻՏԿԵՎԻՉ

ՄԵԾ ԲԵՈՆՈՒՆԱԿՈՒԹՅԱՄԲ ՏՐԱՆՍՊՈՐՏԱՅԻՆ ՄԻՋՈՑԻ ԶԱՐՇԱՅԻՆ
ԷԼԵԿՏՐԱԴՊՈՐՂԱԿԻ ԱՂԱՊՏԻՎ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳ

Ղիտարկված են բազմառանցք պնեվմոանիվային հարթակների շարժաբերում քարշային ասինքրոն էլեկտրահաղորդակի կիրառման առանձնահատկությունները: Բերված է մոմենտի թվային կառավարումով ադապտիվ էլեկտրահաղորդակի կառուցվածքային սխեման և ուսումնասիրված են նրա ստատիկ և դինամիկ աշխատանքային ռեժիմները:

Առանցքային թառեր. ակտիվ անիվ, կառավարվող սոլենոիդ, էլեկտրական դիֆերենցիալ, վեկտորային կառավարում, մոմենտի ուղիղ կառավարում, տրամաբանական ավտոմատ:

E.A. HAKOBYAN, G.I. PITKEVICH

ADAPTIVE CONTROL SYSTEM BY TRACTION ELECTRIC DRIVE OF
HEAVY HAULER

Features of applying asynchronous drive traction in the transmission of multi-axis pneumowheel platform are considered. The block diagram of adaptive electric drive by digital torque control is shown and the static and dynamic operation analyses are given.

Keywords: active wheel, adjustable solenoid, electric differential, vector control, direct torque control, logic automaton.