

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 681.515+68-83

Кравченко О.А., Барыльник Д.В., Сухенко Н.А.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ ТРЕНАЖЁРНЫХ КОМПЛЕКСОВ¹

При построении различных мехатронных систем наряду с решением проблем по реализации их функциональных возможностей, особое внимание необходимо уделять вопросам безопасности при работе на тренажере. В статье обоснован комплекс технических мер, позволяющих обеспечить требования по безопасности стендов обезвешивания тренажеров.

Обосновано техническое решение по реализации режима динамического торможения синхронным электродвигателем с постоянными магнитами совместно с преобразователем частоты при длительных отключениях питающего напряжения. Для реализации режимов ограничений скорости и положения в системах регулирования усилий предложено вводить обратные связи по скорости и положению в момент выхода координат электропривода за максимально допустимые значения. Рассмотрены технические решения, обеспечивающие на тренажере выполнение требований к подъемным механизмам, осуществляющим перемещение людей и соблюдение норм по электробезопасности.

Приведены осциллограммы работы электропривода с активным нагрузочным моментом в режиме динамического торможения и в режиме ограничения скорости и положения на тренажере «Выход-2», эксплуатируемого в ФГБУ НИИ ЦПК им. Ю.А.Гагарина.

Ключевые слова: безопасность, тренажер, ограничение координат, система регулирования усилия, силокомпенсирующая система.

ВВЕДЕНИЕ

Для проверки функционирования изделий космической техники в земных условиях [1], подготовки космонавтов к работе в условиях невесомости [2-4], для построения сбалансированных манипуляторов [5] и специальных грузоподъемных устройств [6, 7], используемых для автоматизации ручного труда при перемещении грузов значительной массы, в медицинских тренажерах [8-10], которые используются для восстановления нарушенных функций опорно-двигательного аппарата пациентов, применяются специальные стенды обезвешивания. При реализации, на базе таких стендов, тренажеров, обеспечивающих имитацию движения космонавтов в невесомости и на планетах с пониженной гравитацией [2-4], медицинских тренажеров для обучения ходьбе пациентов, перенесших острое нарушение мозгового кровообращения, имеющих заболевания опорно-двигательного аппарата [8, 9], наряду с решением проблем по реализации их функциональных возможностей, особое внимание необходимо уделять вопросам функциональной безопасности. К ним можно отнести:

- обеспечение требуемых запасов прочности механизмов перемещения;
- дублирование и страховка элементов подвески человека;
- применение рабочего тормоза в случае исчезновения напряжения питания электродвигателя;
- необходимость плавного опускания человека в случае возникновения аварийных режимов работы тренажерного комплекса;
- ограничение положения человека при его пространственных перемещениях на границах рабочей зоны тренажера.

Рассмотрим особенности реализации комплекса технических мероприятий, позволяющих повысить безопасность функционирования рассматриваемых

стендов обезвешивания [2, 3, 8, 10], на примере тренажеров, предназначенных для подготовки космонавтов.

ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ

На тренажерном комплексе космонавт [2-4] в скафандре может подниматься на высоту до 4-5 м. Поэтому на тренажере должны быть реализованы технические решения, предъявляемые к подъемным механизмам, осуществляющим перемещение людей. При использовании канатной передачи для подвеса скафандра запас её прочности должен быть не менее 7,5-9. Причем для повышения безопасности космонавтов предлагается применять сдвоенный полиспаст с балансиrom, что позволяет удерживать скафандр на весу в случае обрыва одной из ветвей. Для удержания скафандра на весу при обрыве обоих канатов необходимо применять страховочный фал. В случае выхода двигателей из строя необходимо предусматривать применение рабочего тормоза, который должен обеспечивать тормозной момент с учетом коэффициента запаса при торможении, в соответствии с требованиями ПБ 10-257-98, не менее 1,5.

При исчезновении питающего напряжения необходимо обеспечить плавное опускание космонавта в скафандре на нулевую отметку и его эвакуацию из него. Одним из направлений решения указанной проблемы является установка блоков бесперебойного питания в системе электроснабжения, но при больших мощностях электропривода это приводит к существенному увеличению стоимости оборудования. Поэтому предлагается использовать режим динамического торможения двигателя, питающегося от преобразователя частоты. В этом случае построение электропривода вертикальных перемещений космонавтов рекомендуется выполнять на базе синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов.

¹ Результаты работы получены при поддержке проекта № 2878 «Развитие теории и практики создания электротехнических систем тренажерных комплексов и мобильных объектов», выполняемого в рамках базовой части государственного задания № 2014/143.

Реализацию режима динамического торможения при отключении питающего напряжения поясним на примере функциональной схемы силовой части электропривода вертикальных перемещений, приведенной на рис. 1.

При отключении входного питающего напряжения U_c , снимается напряжение участка «a-b» в цепи питания силового контактора $K1$ и он отключается. При действии активного момента M_o , создаваемого весом космонавта и скафандра, вал двигателя M начинает вращаться со скоростью Ω_d , пропорционально которой на обмотках статора наводится трехфазная ЭДС, которая через обратные диоды $VD7$ - $VD12$ инвертора напряжения ИИН поступает в звено постоянного тока и, далее, в узел торможения УТ, состоящего из тормозного сопротивления R_T и силового выключателя $S1$. При замкнутых контактах выключателя $S1$ в цепи протекает тормозной ток I_T , под действием которого на валу двигателя формируется тормозной момент M_T . Реализуется режим динамического торможения, при котором космонавт плавно опускается с допустимой скоростью до нулевой отметки. Для защиты преобразователя частоты ПЧ от появления входного напряжения U_c , при реализации режима динамического торможения, используется контакт $S1.1$, который разрывает цепь питания силового контактора $K1$ и предотвращает его включение.

Анализ требований ПУЭ с учетом особенностей построения и эксплуатации тренажеров для подготовки космонавтов показал, что для защиты от поражения электрическим током, в случае повреждения изоляции, целесообразно применять защитное электрическое разделение сетей. В общественных зданиях и сооружениях, административных и бытовых зданиях питание электроприемников осуществляется от сети 380/220 В с системой TN-S или TN-C-S. Поэтому для построения ИТ сети необходимо использовать разделительные трансформаторы (ГОСТ 30030-93), обеспечив оперативный контроль сопротивления изоляции. Рекомендуется применять трансформаторы с соединением обмоток Δ/Y и реле контроля изоляции, например РКИ-500 со световой и звуковой индикацией.

Актуальной задачей, которую приходится решать при проектировании тренажеров, является ограничение положения космонавтов при его пространственных перемещениях. При этом космонавт должен иметь возможность самостоятельно, без посторонней помощи, вернуться в рабочую зону тренажера. Причем гра-

ницы рабочей зоны должны настраиваться индивидуально в зависимости от программы тренировок. Поэтому ограничение положения предлагается реализовать путем наложения ограничений на перемещения механизмов тренажера. В аварийных ситуациях, например при сбоях системы управления, целесообразно применять концевые выключатели, исключающие дальнейшее перемещение космонавта благодаря снятию напряжения с электроприводов соответствующих координат тренажера и наложению электромагнитного тормоза.

Для реализации ограничений положения и скорости перемещения космонавта в режиме имитации невесомости в структуру системы управления предлагается ввести блоки ограничения момента (БОМ) и ограничения скорости и положения (БОСП) [11], внутренняя структура которых показана на рис. 2, где приняты следующие обозначения:

U_3 – сигнал задания момента, определяемый весом объекта;

$M_0 = \rho m_0 g$ – постоянная составляющая, создаваемая весом объекта, m_0 – масса объекта, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, ρ – радиус приведения;

$k_{РП1}$, $k_{РП2}$ – коэффициенты усиления регуляторов положения РП1, РП2 и регуляторов скорости РС1, РС2;

Ω_{\max} – уставка на ограничение максимально допустимой скорости перемещения космонавта;

M_U , M_ϕ , M_Ω – уровни ограничений выходных сигналов регулятора усиления, задаваемый блоками БО1-БО3, регуляторов положения РП1 и РП2, задаваемый блоками БО4, БО5, регуляторов скорости РС1 и РС2, задаваемый блоками БО6, БО7;

$\phi_0 = (\theta_{\max} + \theta_{\min})/2$ – угловое положение вала двигателя, соответствующее середине рабочей зоны перемещения космонавта;

$\phi_{\max} = (\theta_{\max} - \theta_{\min})/2$ – максимальное угловое положение вала двигателя, соответствующее граничным значениям положения космонавта относительно середины рабочей зоны ϕ_0 ;

θ_{\max} , θ_{\min} – угловые положения вала двигателя, соответствующие максимальной и минимальной границам рабочей зоны перемещения космонавта;

$\Delta\phi = \phi_d - \phi_0$ – отклонение углового положения вала двигателя ϕ_d относительно середины рабочей зоны ϕ_0 ;

U_ϕ , U_Ω – выходные сигналы блока ограничения положения и блока ограничения скорости;

БОП, БОС – блоки ограничения положения и скорости соответственно.

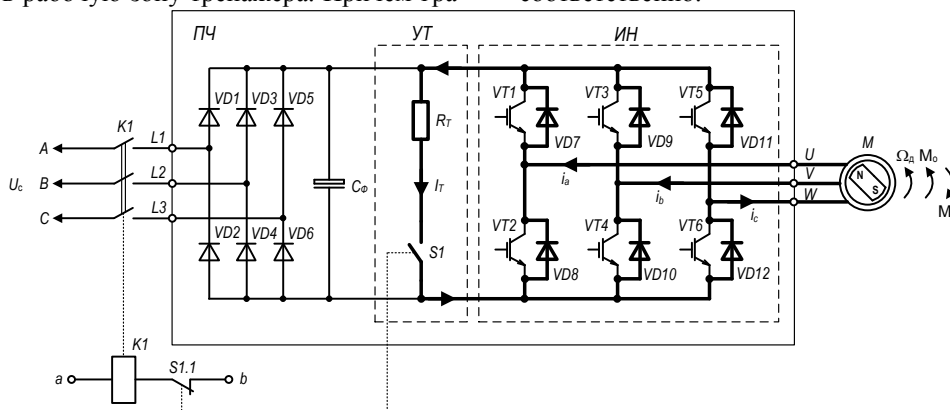


Рис. 1. Функциональная схема силовой части электропривода вертикальных перемещений для режима динамического торможения

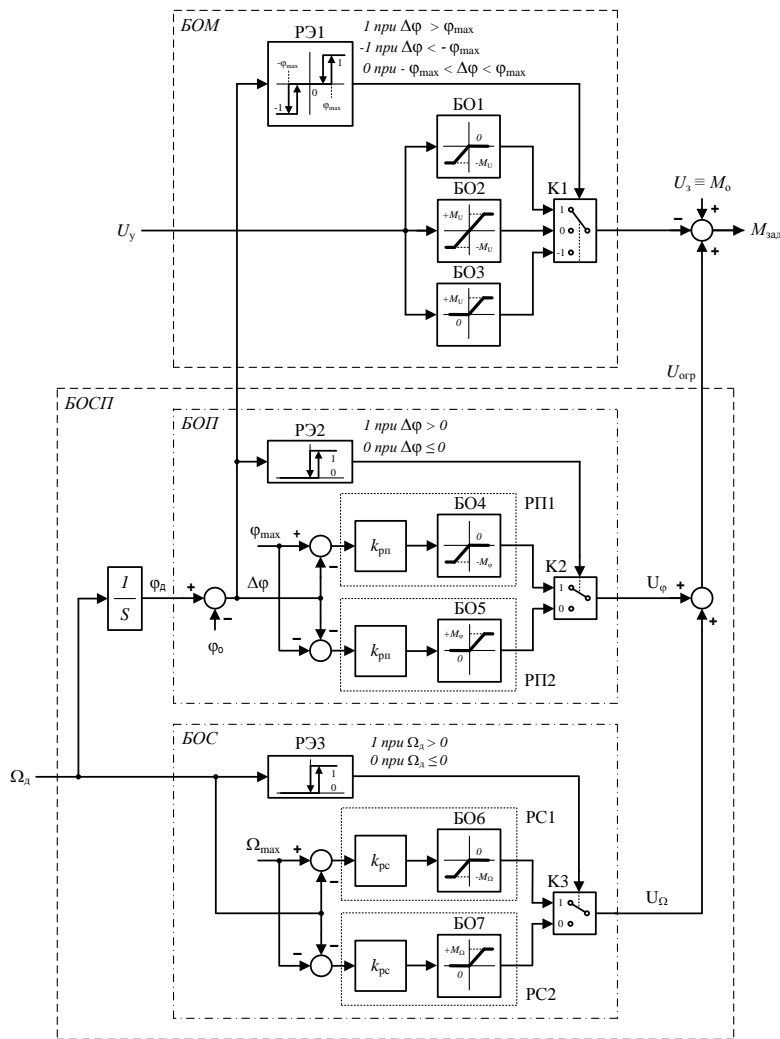


Рис. 2. Структурная схема блока ограничения скорости и положения

Блок БОСП формирует сигнал на ограничение скорости и положения $U_{огр}$ по каналу задания момента двигателя, а с помощью блока БОМ выполняется ограничение выходного сигнала регулятора усилия U_y .

Графическая иллюстрация взаимосвязи переменных θ_{max} , θ_{min} , φ_{max} , φ_0 показана на рис. 3, где Δ – ширина зоны ограничений.

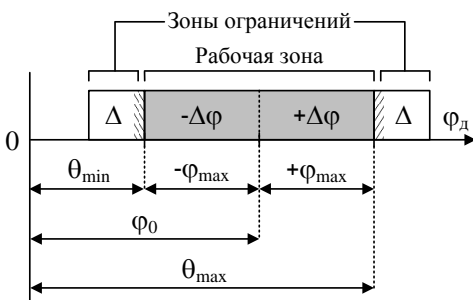


Рис. 3. Графическая иллюстрация взаимосвязи переменных для схемы ограничения положения

Из рис. 3 видно, что в состав блока БОСП входит блок ограничения положения (БОП) и скорости (БОС). Рассмотрим состав и работу каждого из них более подробно.

Блок ограничения положения состоит из двух регуляторов РП1, РП2 с блоками ограничения БО4, БО5, релейного элемента РЭ2 и ключа К2, с помощью которых осуществляется выбор необходимого регулятора в

функции знака сигнала $\Delta\varphi$. При достижении космонавтом границы рабочей зоны тренажёра, задаваемой уставкой на ограничение положения φ_{max} , на выходе регуляторов РП1 и РП2 формируется сигнал управления U_φ , под действием которого космонавт «выводится» из зоны ограничений.

Для повышения эффективности работы схемы ограничения положения на выходе регулятора усилия установлен блок БОМ, состоящий из блоков ограничения БО1-БО3, трехпозиционного релейного элемента РЭ1 и ключа К1. Выбор соответствующего блока ограничения осуществляется ключом К1, положение которого определяется уровнями сигналов, формируемыми релейным элементом РЭ1:

1. Уровень «1» ($\Delta\varphi > \varphi_{max}$) – превышена уставка на ограничение положения φ_{max} , ключ К1 переводится в положение «1» и включает блок ограничения БО1.
2. Уровень «0» ($-\varphi_{max} < \Delta\varphi < \varphi_{max}$) – космонавт находится в пределах рабочей зоны, ключ К1 находится в положении «0», включен блок ограничения БО2.
3. Уровень «-1» – превышена уставка на ограничение положения $-\varphi_{max}$, ключ К1 переводится в положение «1» и включает блок ограничения БО3.

Таким образом, при перемещениях космонавта в пределах рабочей зоны работа регулятора усилия разрешена в обоих направлениях. В случае, если космонавт входит в зоны ограничений, включается один из блоков БО1 или БО3, которые разрешают работу регулятора усилия лишь в одном направлении движения космонавта, при котором возможен его возврат в рабочую зону. После выхода из зоны ограничений снова включается блок БО1, разрешающий работу регулятора усилия в обоих направлениях движения космонавта.

Блок ограничения скорости БОС выполнен аналогично БОП и состоит из двух регуляторов РС1, РС2 с блоками ограничения БО6, БО7, релейного элемента РЭ3 и ключа К3. С помощью последних двух осуществляется выбор того или иного регулятора в функции знака скорости Ω_d .

При работе на скоростях, не превышающих максимально допустимые значения, выходной сигнал блока равен нулю ($U_\Omega=0$). Если скорость перемещения космонавта превысит уставку на ограничение Ω_{max} , то на выходе блока появится сигнал $U_\Omega \neq 0$, который ограничит скорость на заданном уровне.

Настройка регуляторов скорости и положения выполнялась методами математического моделирования, с учетом рекомендаций, изложенных в [12]. Параметры регулятора положения $k_{рп}$ и M_φ определялись в процессе моделирования и выбирались такими, при которых обеспечивался самостоятельный возврат космонавта в рабочую зону. Расчет параметров $W_{рy}(S)$ осуществляется по методике, изложенной в [13].

РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ

Рассмотренный комплекс мер реализован на тренажере «Выход-2» в ФГБУ НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина [3]. На тренажере «Выход-2» обеспечивается перемещение космонавта в скафандре с общей массой до 250 кг, диапазон вертикальных перемещений ±1,0 м, максимальная скорость перемещения 0,4 м/с и ускорение – не более 0,2 м/с². Система управления электропривода вертикальных перемещений содержит: многокоординатный модуль управления Simotion D425, модуль питания и рекуперации Smart (10 кВт), модуль управления двигателем (9 А). Для механизма подъема использован мотор-редуктор серии 1FK7061-7AF71-1FH5-Z J12, состоящий из синхронного двигателя *M* с возбуждением от постоянных магнитов (мощность 1,7 кВт, момент в состоянии покоя 6,4 Нм, номинальный момент 5,4 Нм, номинальная скорость 3000 об/мин) и встроенного планетарного редуктора *Y* типа SP100S-MF2 с передаточным отношением $i_p=16$. Синхронный двигатель имеет встроенный датчик абсолютного положения *B1* с интерфейсом Drive Cliq (многооборотный 22 бит, 4096 оборотов, дополнительная инкрементальная дорожка 2048 имп./об). К выходному валу мотор-редуктора через тормозную муфту присоединен барабан диаметром 100 мм.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оциллограммы работы электропривода вертикальных перемещений в режиме динамического торможения при отключении питающего напряжения, полученные на тренажере «Выход-2» при опускании скафандра массой 140 кг, при сопротивлении $R_T=5,7$ Ом приведены на рис. 4.

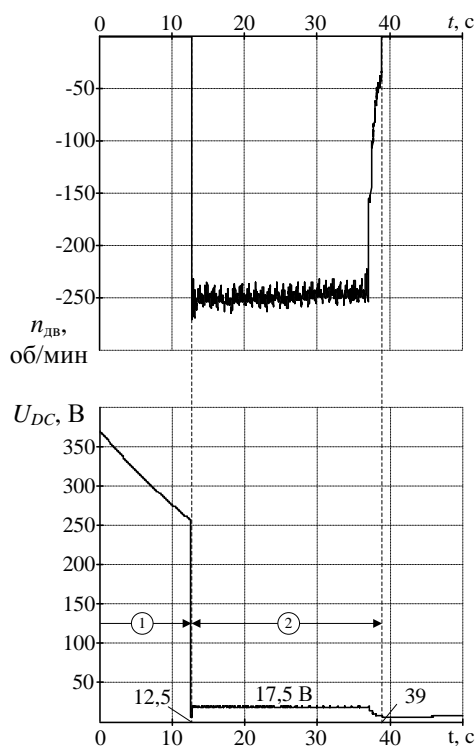


Рис. 4. Оциллограммы скорости и напряжения в звене постоянного тока в режиме динамического торможения

Из приведенных на рис. 4 оциллограмм видно, что после отключения питающего напряжения на участке 1 наблюдается медленное снижение уровня на-

пряжения в звене постоянного тока. В момент времени 12,5 с включается цепь динамического торможения, обеспечивающая быстрый разряд звена постоянного тока на тормозное сопротивление. Скафандр начинает плавно опускаться со скоростью около 0,041 м/с (участок 2). В процессе опускания уровень напряжения в звене постоянного тока постояен и составляет около 17,5 В, что соответствует величине выпрямленной ЭДС, наводимой на обмотках статора синхронного двигателя при вращении ротора со скоростью 250 об/мин. По достижении космонавтом нулевой отметки, в момент времени 39 с, уровень напряжения в звене постоянного тока снижается, скорость двигателя равна нулю. Техническая реализация предлагаемой системы и её работа в данном режиме подробно описана в [14].

Экспериментально полученные оциллограммы работы электропривода вертикальных перемещений в режиме ограничения координат приведены на рис. 5.

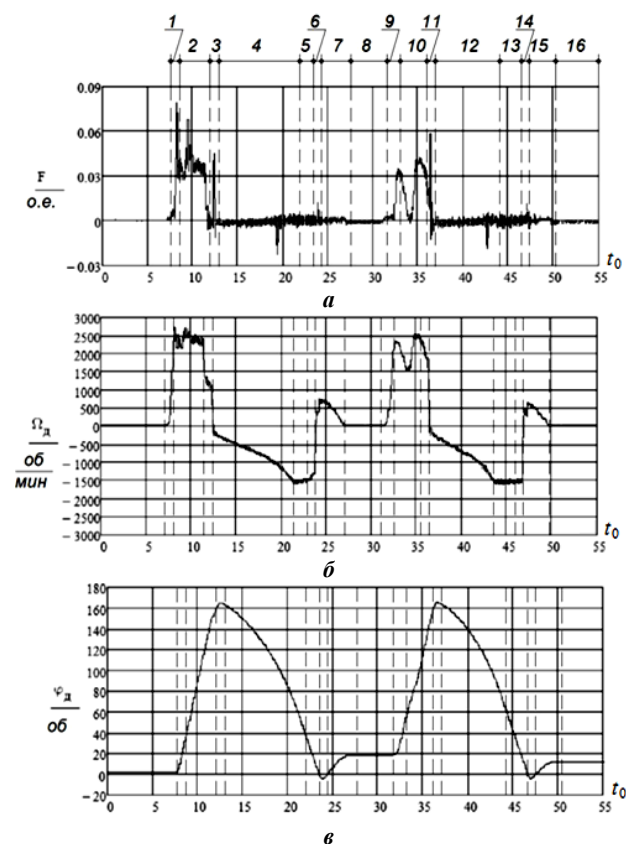


Рис. 5. Оциллограммы работы электропривода вертикальных перемещений в режиме ограничения координат

Из полученных графиков видно, как под действием внешнего силового воздействия *F* скорость движения электропривода Ω_d начинает увеличиваться (участки 1, 9). По достижении скорости двигателя ($\Omega_{max1}=2500$ об/мин) в работу вступает блок ограничения скорости, предотвращающий подъем космонавта на скоростях выше допустимой (участки 2, 10).

В процессе дальнейшего движения космонавта, если он пересекает границу верхней рабочей зоны ($\varphi_{max1}=165$ оборотов), в работу вступает схема ограничения положения φ_d (участки 3, 11). Для возврата космонавта в рабочую зону схема ограничения положения блокирует работу РУ в направлении движения космо-

навта и формирует обратную по знаку составляющую сигнала задания на изменение момента U_{ϕ} .

На участках 4, 12 происходит перемещение космонавта в обратном направлении и при достижении скорости двигателя $\Omega_{\max 2} = -1500$ об/мин в работу вступает блок ограничения скорости, предотвращающий спуск космонавта с высокой скоростью (участки 5, 13). Если космонавт пересекает границу нижней рабочей зоны ($\phi_{\max 2} = -5$ оборотов), то в работу вступает схема ограничения положения (участки 6, 14).

На участках 7–8 и 15–16 происходит окончательный останов космонавта после выхода его из зоны ограничения по положению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

При разработке технических предложений и схемных решений с учётом безопасности функционирования тренажёров необходимо:

- предусмотреть реализацию питания электропривода от ИТ-сети с контролем сопротивления изоляции;
- применение канатной передачи со сдвоенным полиспастом с балансиром, обеспечивающей удержание космонавта на весу в случае обрыва одной из ветвей каната;
- использование режима динамического торможения в СВП для спуска человека в скафандре с высоты при отключении электропитания;
- применение обратных связей по скорости и положению, обеспечивающих перемещение человека в скафандре только в разрешённой рабочей зоне тренажёра и с разрешённой скоростью.

Ограничение скорости и положения в силокомпенсирующих системах целесообразно осуществлять введением дополнительных отрицательных обратных связей по скорости и положению при их выходе за пределы максимально допустимых значений.

Внедрение и длительная эксплуатация предложенных технических решений при реализации системы вертикальных перемещений тренажёра «Выход-2» подтвердило их эффективность при обеспечении требований безопасности работы тренажерных комплексов для подготовки космонавтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Состояние, проблемы, и пути совершенствования систем имитации невесомости для наземной отработки изделий космической техники / Пятибратов Г.Я., Папирияк В.П.,

Полежаев В.Г., Супчев А.И. // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Технические науки. 1995. №3-4. С. 39-49.

2. Кравченко О.А., Пятибратов Г.Я. Создание и опыт эксплуатации силокомпенсирующих систем, обеспечивающих многофункциональную подготовку космонавтов к работе в невесомости // Изв. вузов. Электромеханика. 2008. №2. С. 42–47.

3. Бабкин А. Лунный стенд для марсиан // Новости космонавтики. 2003. № 10. С. 20.

4. NASA. Active Response Gravity Offload System (ARGOS). Mode of access: [http://www.nasa.gov/centers/johnson/engineering/integrated environments /active response gravity/index.html](http://www.nasa.gov/centers/johnson/engineering/integrated%20environments/active%20response%20gravity/index.html).

5. Владов И.П., Донелевский В.Н., Ионов П.Б. и др. Сбалансированные манипуляторы / под ред. П.Н. Белянкина. М.: Машиностроение, 1988. 216 с.

6. Stanley. Mode of access: <http://www.stanleyassembly.com>.

7. Gorbel. Mode of access: <http://www.gorbel.com>.

8. Vallery H., Lutz P., Von Zitzewitz J., Rauter G., Fritschi M., C. Everarts, Ronsse R., Curtk A., Bollige M. Multidirectional Transparent Support for Overground Gait Training // Proceedings of the IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR). 2013 (англ.).

9. Patton J., Brown D.A., Peshkin M., Santos-Munné J.J., Makhlin A., Lewis E., Colgate J.E., Schwandt D. KineAssist: Design and Development of a Robotic Overground Gait and Balance Therapy Device // Top Stroke Rehabil. 2008. Vol. 15. Pp.131-139 (англ.).

10. Пат. 106104 РФ, МКИ А61G3/00. Устройство реабилитации пациентов с нарушением опорно-двигательного аппарата / О.А. Кравченко, Н.А. Демченко. Патентообладатель ГОУ ВПО ЮРГТУ (НПИ). № 2010129902/12. Заявл. 16.07.10. Опубл. 10.07.2011. Бюл. № 19. 2 с.

11. Барыльник Д.В., Кравченко О.А., Бекин А.Б. Особенности реализации режимов ограничения скорости и положения в системах регулирования усилий // Электротехника. 2014. №3. С. 39-44.

12. Пятибратов Г.Я. Оптимизация систем подчиненного регулирования электроприводов при учете упругости механических передач //Изв. вузов. Электромеханика. 1986. №6. С. 72–82.

13. Кравченко О.А., Пятибратов Г.Я. Синтез оптимального регулятора усилий в электромеханических системах с упругими связями // Изв. вузов. Электромеханика. 1998. №4. С. 58–63.

14. Барыльник Д.В., Кравченко О.А., Бекин А.Б. Реализация режима динамического торможения синхронного частотно – регулируемого электропривода при отключении питающего напряжения // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2013. №6(175). С. 79–82.

INFORMATION IN ENGLISH

MEASURES PROVIDING SAFE OPERATION OF MECHATRONIC SYSTEM TRAINING COMPLEXES

Kravchenko O.A., Barylnik D.V., Sukhenko N.A.

When constructing various mechatronic systems, special attention needs to be paid to the issues related to the training system's safety. The article provides a comprehensive set of engineering controls which allow ensuring the safety requirements for weight compensation stands of the training system.

A sound engineering solution is given to enable a dynamic slowdown condition with the synchronous permanent magnet motor coupled with frequency converter during a long power dump. In order to set the modes of speed and position limitations in force controlling systems, it is proposed to put in speed and

position feedbacks as soon as the coordinate values of the electric drive are exceeded. Engineering solutions that ensure compliance with electrical safety norms are studied.

The research group presented the oscillograms of the electric drive performance with an active load torque in the dynamic slowdown mode and in the speed and position limitations mode from Vyhkod 2 ("Exit into Space") training system operated at Yu.A. Gagarin Research Cosmonauts Training Centre (Federal State Budget Institution).

Keywords: safety, trainer, limitation of coordinates, force

controlling system, force compensation systems.

REFERENCES

1. Pyatibratov G.Ya., Papirnyak V.P., Polezhaev V.G., Supchev A.I. Sostoyanie, problem, i puti sovershenstvovaniya system imitatsii nevesomosti dlya nazemnoi otrabotki izdelii kosmitseskoj tehniky [Status, problems and ways to improve the systems of weightlessness simulation for ground testing of space technology products]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. Region. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the Universities. North-Caucasus region. Technical sciences.], 1995, no.3-4, pp. 39-49 (in Russ.).
2. Kravchenko O.A. Pyatibratov G.Ya. Sozdanie i opyt ekspluatatsii silokompensiruyutscikh system, obespektivayuschikh mnogofunktionalnyu podgotovku k rabote v nevesomosti [Creating and operating experience the force compensation systems provide versatile training astronauts to work in weightlessness]. *Izv. vuzov. Electromekhanika*. [Proceedings of the Universities. Electromechanics.], 2008, no.2, pp. 42-47 (in Russ.).
3. Babkin A. Lunnyi stend dlya marsian [Lunar stand for the Martians]. *Novosti kosmonavтики* [News of the Astronautics], 2003, no.10, p. 20.
4. NASA. Active Response Gravity Offload System (ARGOS). Mode of access: [http://www.nasa.gov/centers/johnson/engineering-integrated environments /active response gravity/index.html](http://www.nasa.gov/centers/johnson/engineering-integrated%20environments/active%20response%20gravity/index.html).
5. Vladov I.P., Donelevskii V.N., Ionov P.B. *Sbalansirovannye manipulyatory* [Balanced manipulators]. Moscow: Mashinostroenie, 1988, 216 p.
6. Stanley. Mode of access: <http://www.stanleyassembly.com>.
7. Gorbel. Mode of access: <http://www.gorbel.com>.
8. Vallery H., Lutz P., Von Zitzewitz J., Rauter G., Fritsch M., C. Everarts, Ronsse R., Curtk A., Bollige M. Multidirectional Transparent Support for Overground Gait Training // Proceedings of the IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR). 2013.
9. Patton J., Brown D.A., Peshkin M., Santos-Munné J.J., Makhlin A., Lewis E., Colgate J.E., Schwandt D. KineAssist: Design and Development of a Robotic Overground Gait and Balance Therapy Device // *Top Stroke Rehabil.* 2008. Vol. 15. Pp.131-139.
10. RF Patent 106104 РФ, МКИ А61G3/00106104 РФ, МКИ А61G3/00. Rehabilitation device for patients with supporting-motor apparatus disorder / O.A. Kravchenko, N.A. Demchenko; patent holder SEI HPE «SRSTU (NPI)». No. 2010129902/12; applied on 16.07.2010; published on 10.07.2011. Bulletin no. 19. p. 2.
11. Barylnik D.V., Kravchenko O.A., Bekin A.B. Features of establishing regimes of limited speed in power-regulation systems // *Russian Electrical Engineering.* 2014, vol. 85, Issue 3, pp. 156-161.
12. Pyatibratov G.Ya. Optimizatsiya sistem podchinnogo regulirovaniya elektroprivodov pri uchete uprugosti mekhanicheskikh peredach [Optimization of the slave control of electric drives with allowance the elastic mechanical gears]. *Izv. vuzov. Electromekhanika* [Proceedings of the Universities. Electromechanics], 1986, no.6, pp. 72-82.
13. Kravchenko O.A., Pyatibratov G.Ya. Sintez optimalnogo regulatora usilii v elektromekhanicheskikh sistemah s uprugimi svyazyami [Synthesis of optimal control in Electromechanical systems with elastic couplings]. *Izv. vuzov. Electromekhanika* [Proceedings of the Universities. Electromechanics.], 1998, no.4, pp. 58-63.
14. Barylnik D.V. Kravchenko O.A., Bekin A.B. Realizatsiya regima dinamicheskogo tormozheniya sinhronnogo chastotno-reguliruemogo elektroprivoda pri otkluchenii pitayuschego napryazheniya [Implementing dynamic braking mode synchronous variable frequency drive when disconnecting the power supply]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. Region. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the Universities. North-Caucasus region. Technical sciences.]. 2013, no.6, pp. 79-82.

УДК 62-83

Ишматов З.Ш., Плотников Ю.В., Гурентьев Е.А.

**РОБАСТНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ ТОКА И СКОРОСТИ
ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

Рассматривается асинхронный частотно-регулируемый электропривод с векторным управлением при параметрических и внешних возмущениях. Предложены робастные регуляторы проекций фазных токов и скорости, обеспечивающие слабую чувствительность к возмущениям.

Ключевые слова: частотно-регулируемый асинхронный электропривод, интервальная модель, робастное управление.

ВВЕДЕНИЕ

Асинхронный частотно-регулируемый электропривод с векторным управлением является многосвязным и нелинейным объектом управления. В состав уравнений, описывающих объект, входят параметры, значения которых подвержены изменениям. Кроме того, на электропривод действует ряд внешних возмущений. Традиционные способы представления объекта управления не дают возможности учесть вариацию параметров как явление, что затрудняет анализ статических и динамических свойств полученной системы в условиях внешних и внутренних возмущений.

Предлагается для анализа процессов в двигателе и связанном с ним исполнительном механизме использо-

вать известную схему замещения асинхронного двигателя и общепринятое представление обобщенной двухмассовой механической системы с упругостью первого рода.

Из Т-образной схемы замещения, представленной на **рис. 1**, видно, что основными параметрами асинхронного двигателя (АД) являются индуктивности рассеяния $L_{\sigma\sigma}$ и $L_{r\sigma}$, активные сопротивления R_s и R_r обмоток статора и ротора, взаимная индуктивность L_m .

Параметрами обобщенной двухмассовой упругой системы, изображенной на **рис. 2**, являются суммарные приведенные моменты инерции элементов, жестко связанных с двигателем J_1 и рабочим органом механизма J_2 , приведенная эквивалентная жесткость C_{12} ,