

На правах рукописи

Котенев Владимир Викторович

**МНОГОМАССОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД МЕХАНИЗМА
НАТЯЖЕНИЯ УЧАСТКА СИСТЕМЫ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НАПОЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО
СРЕДСТВА**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2010

Работа выполнена на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель: *доктор технических наук, профессор,*
Котенев Виктор Иванович

Официальные оппоненты: *доктор технических наук, профессор,*
Кузнецов Павел Константинович
кандидат технических наук, доцент,
Масляницын Александр Петрович

Ведущая организация: *ГОУ ВПО «Самарский государственный*
аэрокосмический университет имени ака-
демика С. П. Королева» (г. Самара)

Защита диссертации состоится 7 декабря 2010 г. в 14 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.217.04 ГОУ ВПО «Самарский государственный технический университет» (СамГТУ) по адресу: г. Самара, ул. Первомайская, 18, корпус № 1, ауд. 4.

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: Россия, 443100, ул. Молодогвардейская 244, Главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.217.04; тел.: (846) 278-44-96, факс (846) 278-44-00; e-mail: krotkov@samgtu.ru .

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета, а с авторефератом — на официальном сайте СамГТУ (<http://www.samgtu.ru>).

Автореферат разослан 3 ноября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.217.04,

кандидат технических наук, доцент



Кротков Е. А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Напольные транспортные средства – это различного вида штабелеры, тележки, электрокары, автопогрузчики и т.д. используются для производства погрузочно-разгрузочных работ в складских и некоторых цеховых помещениях практически на всех больших и малых предприятиях нашей страны. Применение автомобильного газо-бензинового транспорта связано с неудовлетворительной экологией и его использование во многих случаях, особенно, на предприятиях пищевой промышленности проблематично.

Использование аккумуляторных напольных транспортных средств позволяет в некоторой степени улучшить экологические характеристики, но это связано с дополнительными эксплуатационными издержками обусловленными необходимостью зарядных устройств, вентилируемых помещений, дополнительного персонала, замены дорогостоящих аккумуляторных батарей, замены и утилизации электролита и т.д.

Перевод напольного транспорта на кабельное питание от электрической сети позволяет значительно улучшить экологию и уменьшить издержки на его обслуживание, но при этом из-за несовершенства электромеханической системы натяжения снижается надежность выполнения погрузочно-разгрузочных работ. В качестве систем натяжения нашли применение, в основном, транспортные средства с пружинным и асинхронным нерегулируемым приводом механизма натяжения, которые из-за несовершенства механизма натяжения и регулирования натяжения имеют низкую надежность по причине частых обрывов в системе электроснабжения.

Транспортные средства с регулируемым электроприводом постоянного тока механизма натяжения и с улучшенными ресурсными характеристиками – повышенной колебательностью и невысокой точностью регулирования усилий натяжения и стрелы провиса питающего кабеля.

Поэтому разработка электромеханического оборудования с улучшенными динамическими характеристиками, позволяющими повысить надежность работы транспортных средств является важной народно-хозяйственной задачей. Особенно актуально применение транспортных средств с кабельным питанием от сети для предприятий малого и среднего бизнеса, где уменьшение издержек в логистике является одной из основных проблем.

Целью диссертационной работы является разработка, исследование и создание системы управления электроприводом натяжения участка системы электроснабжения напольных транспортных средств, обеспечивающей повышенную надежность за счет улучшения динамических характеристик

(плавности, колебательности, быстродействия и т.д.) электропривода.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- проведение анализа современного состояния электроприводов механизмов натяжения движущегося материала;
- математическое описание механизма натяжения питающего кабеля с учетом распределенности масс по длине подвесной линии питания;
- разработка и исследование математической модели механизма и построенных на ее основе структур систем управления электроприводов с обратными связями по различным переменным;
- разработка алгоритмов управления усилием натяжения, обеспечивающих необходимую величину стрелы провиса питающего кабеля;
- конструирование и экспериментальные исследования разработанных электроприводов натяжения.

Методы исследований. Использованы методы математического анализа, в частности приближенные методы решения задач математической физики, методы теории автоматического управления и теории автоматизированного электропривода, а также методы компьютерных и экспериментальных исследований.

Достоверность полученных результатов исследований определяется корректным использованием математического аппарата, вычислительных программных комплексов, обоснованностью принятых допущений и подтверждается совпадением результатов расчетов и экспериментальных данных.

Научная новизна. В данной работе получены следующие основные результаты:

- математическая модель механизма натяжения, отличающаяся от аналогов повышенной точностью за счет учета распределенности масс подвесной линии и замены сосредоточенной силы, приложенной по нормали к подвесной линии, эквивалентной распределенной силой;
- методика вычисления жесткости подвесной линии и методика определения жесткости промежуточной линии, отличающаяся учетом расположения точек подвеса на разных высотах;
- алгоритмы управления усилием натяжения и определение погрешности их воспроизведения по заданной погрешности стабилизации стрелы провиса;
- структуры систем управления электроприводом механизма натяжения, новизна которых подтверждена патентом на изобретение.

Практическая значимость работы:

- разработана оригинальная конструкция механизма натяжения, которая защищена патентом на изобретение;
- предложена методика аппроксимации подвесной линии питания как

объекта с распределенными параметрами эквивалентным объектом с сосредоточенными параметрами;

- разработаны схемы электроприводов механизма натяжения с различными связями по регулируемым переменным.

Реализация результатов работы. Напольные транспортные средства в виде электропогрузчиков типа ЭП 103 КО, ЭП 1616, ЕВ 717 и др., оснащенные системой электроснабжения с электроприводом механизма натяжения, разработанной на основе диссертационной работы, внедрены и на протяжении нескольких лет эксплуатируются на предприятиях г. Самары: ОАО ПКК «Весна», Г.К. «Аист», ЗАО «Капель» и др.

Основные положения выносимые на защиту:

1. Математическая модель механизма натяжения питающего кабеля с учетом распределенности масс подвесной линии питания.

2. Методика определения жесткости кабельной линии системы электроснабжения напольного транспорта.

3. Алгоритмы задания усилия натяжения и методика определения погрешности их воспроизведения.

4. Результаты аналитических и экспериментальных исследований систем управления электроприводов натяжения с учетом упругих связей и систем управления с обратными связями по переменным состояниям.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы трибологии» (г. Самара, 2007 г.)

- Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистров и аспирантов «Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов» (г. Тольятти, 2007 г.)

- Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука, технология, инновации» (Новосибирск, 2007 г., 2008 г.)

- Двенадцатой международной научной конференции по математическим методам в технике и технологиях (Саратов, 2008 г.)

- Одиннадцатой всероссийской научно-технической конференции по электротехнологии, электроприводу и электрооборудованию предприятий (Уфа, 2009 г.)

- Международной научно-технической конференции студентов, магистров и аспирантов «Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов» (Тольятти, 2009 г.)

- Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: состояние и проблемы» (Оренбург, 2010 г.)

- Шестой международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2010 г.)

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано 13 печатных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, включающего 110 наименований. Работа изложена на 145 листах машинописного текста, содержит 113 рисунков, 7 таблиц.

Краткое содержание работы

Во введении показана актуальность темы работы, определены ее цель и основные задачи исследований, намечены методы их решения, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, приведены результаты реализации работы, обоснована достоверность полученных результатов и выводов, представлены основные положения, выносимые на защиту, приведены места апробации результатов и сведения об их публикации, описаны объем и структура диссертации.

В первой главе приведен анализ современного состояния электрического напольного транспорта и отмечены основные направления его развития. Показано, что электрический напольный транспорт в виде аккумуляторных электропогрузчиков, тележек, штабелеров и т.д. получил достаточно широкое распространение при выполнении погрузочно-разгрузочных работ в цехах и складских помещениях на предприятиях различных отраслей промышленности.

Напольные транспортные средства с питанием от электрической сети с пружинным и нерегулируемым асинхронным приводом механизма натяжения питающего кабеля во избежание его обрыва работают, в основном, с заниженной производительностью и при обслуживании помещений или площадок размером до 5000 м². Применение транспортных средств с более совершенным направляющим устройством и регулируемым электроприводом постоянного тока механизма натяжения позволило повысить надежность и производительность агрегата, но его ресурсные характеристики из-за повышенной колебательности упругих сил натяжения остались неудовлетворительными.

Показано, что механизм натяжения питающего кабеля с подвесной линией питания при рассмотрении их как объекта управления упругими силами относится к нелинейным объектам с распределенными и переменными параметрами, что не позволило в полной мере воспользоваться известными математическими моделями следующих ученых: В.Д. Барышникова, Ю.А. Борцова, А.И. Бычкова, Б.Ш. Бургина, Б.В. Квартального, В.И. Клю-

чева, Г.Г. Соколовского, В.М. Шестакова, Ф.К. Фоттлера, В.И. Яковлева и др.

Отмечено, что построение системы управления электроприводом натяжения на базе математической модели, учитывающий распределенность масс подвесной линии питания и разновысотное расположение подвесных точек промежуточной линии, а также разработка алгоритмов управления усилием натяжения позволило значительно улучшить ресурсные характеристики транспортного средства.

Во второй главе рассматриваются электропогрузчики с различными вариантами конструктивного исполнения и математического описания механизмов натяжения совместно с подвесной линией питания, ориентированных на построение автоматизированного электропривода.

Общий вид электропогрузчиков с горизонтальным и вертикальным расположением осей кабельного барабана представлены на рис. 1, на которых показаны:

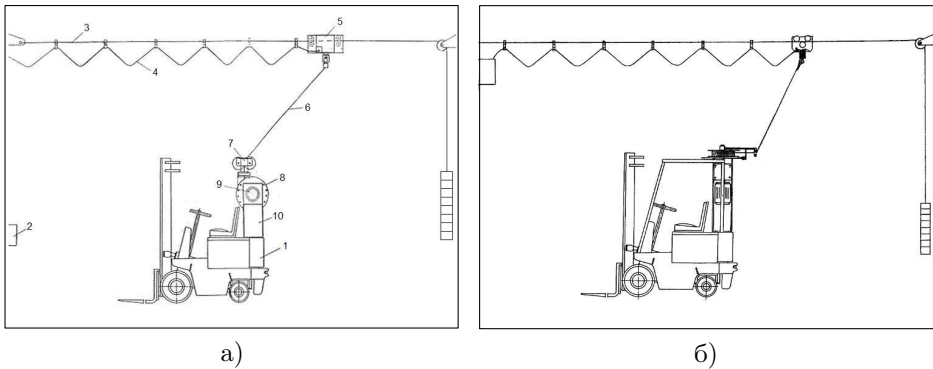


Рис. 1. Электропогрузчики с горизонтальным (а) и вертикальным (б) кабельными барабанами.

1 — электропогрузчик; 2 — настенный щиток; 3 — несущий стальной трос; 4 — подвесной кабель; 5 — каретка с токосъемником; 6 — промежуточный кабель; 7 — направляющее устройство; 8 — барабан; 9 — электродвигатель; 10 — подставка. Бортовое электрооборудование размещено в аккумуляторном ящике.

Операторные уравнения механической части электропривода без подвесной линии питания:

$$\Delta\omega(p) = \frac{1}{Jp} (\Delta M(p) - R_6 \Delta F_1(p));$$

$$\Delta F_1(p) = c_{\kappa} \frac{T_2 p + 1}{p} (\Delta V_{\kappa}(p) - \Delta V_{\tau}(p) - \Delta V_{\Pi}(p)); \quad (1)$$

$$\Delta V_{\kappa}(p) = R_6 \Delta \omega(p),$$

где J — момент инерции электропривода; M — момент электродвигателя; R_6 — радиус барабана; ω — угловая скорость барабана; M_y — упругий момент; V_{κ} — скорость перемещения промежуточного кабеля; $T_2 = (J/(4c_{\kappa}R_6^2))^{0.5}$ — постоянная времени первого упругого звена; c_{κ} — жесткость участка «направляющие ролики-промежуточный кабель».

Подвесная линия питания с некоторыми допущениями представлена неравномерно нагруженной струной. Уравнение поперечных колебаний ее в среде с сопротивлением

$$\frac{\rho(x)}{F_{\text{H}}} \frac{\partial^2 U(x, t)}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{F_{\text{H}}} \frac{\partial U(x, t)}{\partial t} - \frac{\partial^2 U(x, t)}{\partial x^2} - \frac{\rho(x)q}{F_{\text{H}}} - \frac{2F_{\kappa}(t)}{lF_{\text{H}}} = 0, \quad (2)$$

$$0 \leq x \leq l, \quad t > 0$$

с граничными условиями

$$U(x, 0) = U(x), \quad U(0, t) = U(l, t) = 0,$$

$$\frac{\partial U(0, t)}{\partial x} = \frac{\partial U(l, t)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

($U(x, t)$ — отклонение от положения равновесия; x — координата, направленная по длине струны; F_{H} — сила натяжения; $\rho(x)$ — масса единицы длины струны; l — длина струны; q — ускорение свободного падения; t — текущее время; F_{κ} — усилие, приложенное к подвесной линии со стороны промежуточного кабеля) аппроксимировано системой обыкновенных дифференциальных уравнений, на основании которой составлено операторное уравнение в отклонениях:

$$\Delta U_i(p) = D_i^{-1}(p) (-r_{3i} \Delta U_{i-1}(p) - E_i(p) \Delta U_{i+1}(p) + k_{\Pi i} \Delta F_{\kappa}(p)), \quad (4)$$

$$i = 2, 3, \dots, n,$$

$$r_{3i} = \frac{-a_{1i} \Delta x_i}{a_{10i}}; \quad k_{\Pi i} = \frac{-\Delta x_i^2}{a_{10i} l F_{\text{H}}}; \quad d_{1i} = \alpha d_{3i}; \quad d_{2i} = \rho_3 d_{3i}; \quad d_{3i} = \frac{a_{7i}}{a_{10i} F_{\text{H}}};$$

$$D_i(p) = d_{2i} p^2 + d_{1i} p + 1; \quad E_i(p) = e_{2i} p^2 + e_{1i} p + e_{0i};$$

$$e_{0i} = \frac{a_{1i} \Delta x_i - 1}{a_{10i}}; \quad e_{1i} = \frac{\alpha a_{8i}}{a_{10i} F_{\text{H}}}; \quad e_{2i} = \frac{a_{8i} \rho_i}{a_{10i} F_{\text{H}}}.$$

При линейной аппроксимации:

$$a_{1i} = \frac{1}{2\Delta x_i}; \quad a_{7i} = \frac{\Delta x_i^3}{3}; \quad a_{8i} = \frac{\Delta x_i^2}{6}; \quad a_{10i} = 1.$$

Уравнение (4) при $n = 2$ представлено в виде:

$$\Delta V_{\text{п}}(p) = \frac{1}{mp} [\Delta F_1(p) - \Delta F_2(p)]; \quad (5)$$

$$\Delta F_2(p) = \frac{c_{\text{п}}(T_4 p + 1)}{p} \Delta V_{\text{п}}(p); \quad \Delta V_{\text{п}}(p) = p U_2(p),$$

где $c_{\text{п}} = 4F_{\text{н}}/l$ — жесткость подвесной линии; m , $V_{\text{п}}$ — масса и скорость перемещения подвесной линии; p — оператор Лапласа; F_1 , F_2 — упругие силы в промежуточном кабеле ($F_2 = F_{\text{к}}$) и подвесной линии питания.

По уравнениям (1), (5) построена структурная схема (рис. 2) механической части электропривода (пружинного) механизма натяжения промежуточного кабеля.

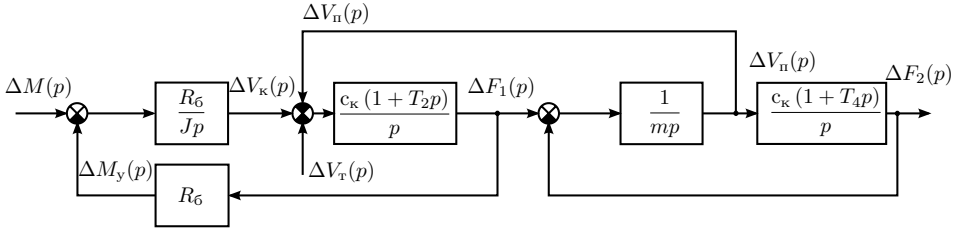


Рис. 2. Структурная схема механической части электропривода механизма натяжения промежуточного кабеля.

Установлена зависимость жесткости участка «промежуточный кабель – направляющие ролики» от удаленности l транспортного средства (от каретки) и от усилия натяжения F для $\Delta h = 0, 1, 2, 3$ м

$$c_{\text{к}} = \frac{24(F_1 - F_2)}{p_{\text{к}} l \left[(F_1^2 - a_1^2 p_{\text{к}}^2)^{-0.5} - (F_2^2 - a_2^2 p_{\text{к}}^2)^{-0.5} \right]}; \quad (6)$$

$$a_i = 0.5 (l^2 + \Delta h^2)^{-1} \left[l^3 - \frac{\Delta h}{p_{\text{к}}} (4F_i^2 (l^2 + \Delta h^2) - p_{\text{к}}^2 l^4) \right];$$

$$a_i \geq 0, \quad i = 1, 2.$$

Максимальное значение жесткости $c_{\kappa} \approx 10^4$ Н/м при малых l обусловлено величиной деформации оболочек витков кабеля на барабане. Отличие в значениях жесткости при $\Delta h_1 = 0$ и $\Delta h_2 = 3$ м не превышает 25%.

Динамика механизма натяжения описывается дифференциальными уравнениями четвертого порядка. Так, например, при входном воздействии $\Delta M(p)$ и выходном — $\Delta F_2(p)$ операторное уравнение принимает вид:

$$\Delta F_2(p) = \frac{D_1(p)}{R_6 D_2(p)} \Delta M(p); \quad (7)$$

$$D_1(p) = (T_2 p + 1)(T_4 p + 1);$$

$$D_2(p) = T_1^2 T_3^2 p^4 + [T_1^2 T_4 + T_2 (T_3^2 + T_5^2)] p^3 + (\alpha^{-1} T_1^2 + T_3^2 + T_2 T_4) p^2 + (T_2 + T_4) p + 1;$$

$$T_1 = \frac{1}{R_6} \sqrt{\frac{J}{c_{\kappa}}}; \quad T_2 = 2T_1; \quad T_3 = \sqrt{\frac{m}{c_{\Pi}}}; \quad T_4 = 2\xi T_3; \quad T_5 = \sqrt{\frac{c_{\kappa}}{c_{\Pi}}} T_1;$$

$$\alpha = \frac{c_{\Pi}}{c_{\kappa} + c_{\Pi}}.$$

Показано, что величина коэффициентов демпфирования ξ , полученных из анализа расчетных и экспериментальных переходных характеристик получились равными: $\xi_1 = 0,11$ для механизма с максимальными параметрами механизма натяжения (ПМН) ($R_6 = 0,17$ м, $J = 0,177$ кг м², $c_{\kappa} = 10^4$ Н/м, $l = 0$, $m = 9$ кг, $c_{\Pi} = 420$ Н/м) и $\xi_2 = 0,3$ для механизма с минимальными параметрами ($R_6 = 0,1$ м, $J = 0,0324$ кг м², $c_{\kappa} = 48$ Н/м, $l = 20$ м, $c_{\Pi} = 420$ Н/м).

Вследствие слабой чувствительности динамических характеристик механизма к изменению диаметра барабана его диаметр, с целью увеличения силы натяжения, следует выбирать минимально возможным, но не меньше диаметра токосъемного устройства.

С целью снижения колебательности разгон и замедление транспортного средства с пружинным механизмом натяжения следует производить по колебательно затухающей программе ($T_{\Pi} = 0,3$ с, $\xi_{\Pi} = \sqrt{2}/2$).

Переходные характеристики пружинного механизма натяжения при разгоне транспортного средства представлены на рис. 3. Размерность приращений переменных величин (Δ — опущено): ω — 1/с; V_T — м/с; F_1, F_2 — Н.

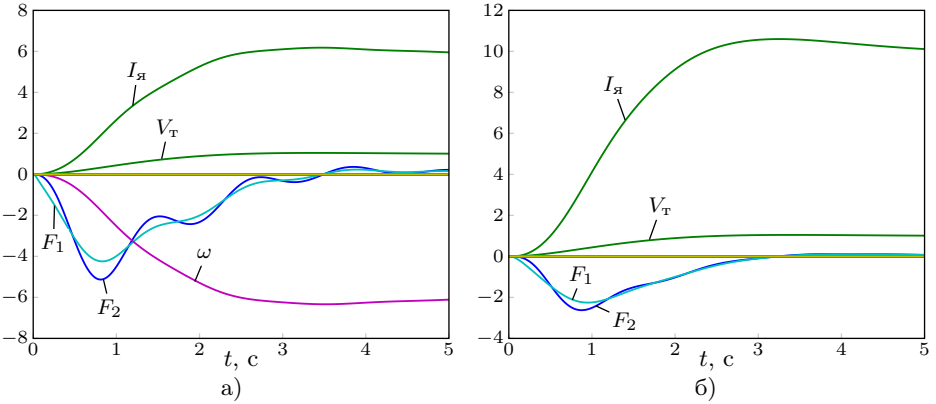


Рис. 3. Переменные системы в переходном процессе при изменении скорости передвижения по колебательно-затухающей программе в системе с максимальными (а) и минимальными (б) параметрами механизма натяжения (ПМН).

Установлено, что уменьшение сопротивления электромагнитной постоянной времени (рис. 4) способствует демпфированию колебаний в системе.

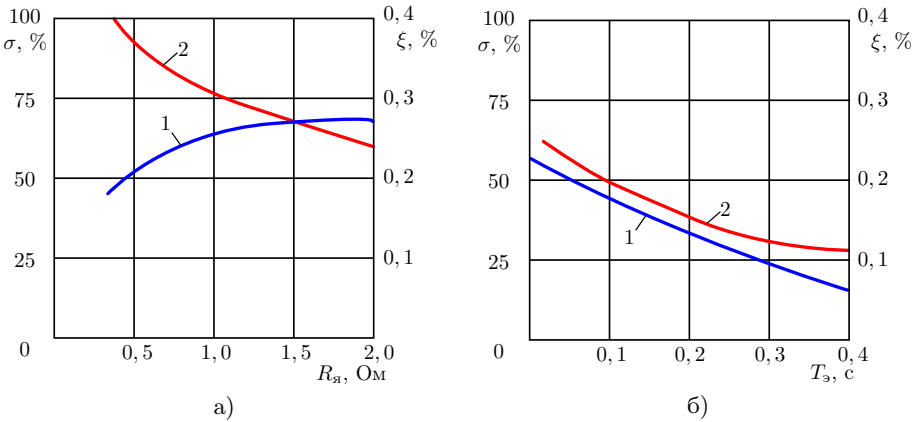


Рис. 4. Зависимость перерегулирования σ (кривые 1) и коэффициента демпфирования ξ (кривые 2) от сопротивления якоря $R_{я}$ ($L_{э} = 0,02$ Гн) и от величины электромагнитной постоянной времени $T_{э}$ ($R_{я} = 0,4$ Ом).

В третьей главе изложены требования, предъявляемые к механизмам натяжения; алгоритмы регулирования момента натяжения и различные структуры электроприводов механизмов натяжения промежуточного кабеля.

Показано, что для поддержания стрелы провиса на заданном уровне ε_3 , для механизма с однорядной укладкой кабеля на барабане, усилие натяжения F , полученное из решения нелинейного уравнения

$$p_K^2 a^2 - 2\varepsilon_D \sqrt{F^2 - p_K^2 a^2} = 0, \quad (8)$$

$$a = \frac{p_K l^3 - \Delta h \sqrt{4F^2(l^2 + \Delta h^2) - p_K^2 l^4}}{2p_K(l^2 + \Delta h^2)}$$

для $\varepsilon_3 = 0, 25; 0, 5; 0, 75; 1, 0$ м, $\Delta h = 0, 1, 2, 3$ м, $0 \leq l \leq 30$ м с погрешностью не более 10 % аппроксимированы (рис. 5, 6) линейными функциями

$$F_a = \begin{cases} F_{CM}, & l \leq l_H(\Delta h, \varepsilon_3) \\ F_{CM} + b(\Delta h, \varepsilon_3)(l - l_H(\Delta h, \varepsilon_3)), & l \geq l_H(\Delta h, \varepsilon_3) \end{cases}, \quad (9)$$

где F_{CM} – значение максимальной силы трения, зависящей от коэффициента трения, числа колец и массы подвесного кабеля.

Установлено, что требуемая погрешность воспроизведения программы изменения силы натяжения меньше требуемой погрешности стабилизации петли провиса

$$\Delta F(\varepsilon_3)/F = k_{\min} \Delta \varepsilon_3/\varepsilon_3. \quad (10)$$

Зависимость минимального значения коэффициента $k_{\min} = f(\varepsilon_3, \Delta h)$ представлена на рис. 6.

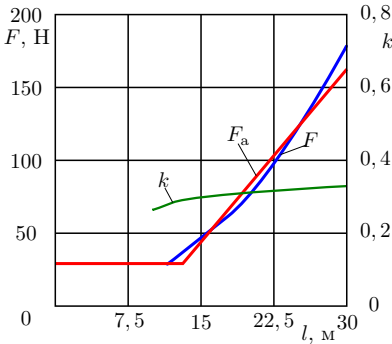


Рис. 5. Зависимость силы натяжения и коэффициента k от l при $\Delta h = 3$ м и $\varepsilon_3 = 0, 5$ м.

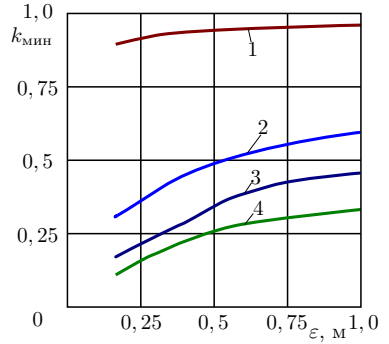


Рис. 6. Зависимость минимального коэффициента от допустимого провиса кабеля: 1 – $\Delta h = 0$; 2 – $\Delta h = 1$ м; 3 – $\Delta h = 2$ м; 4 – $\Delta h = 3$ м.

Рассмотрено построение с последующим анализом динамических характеристик систем управления электроприводом натяжения кабеля со связями по различным переменным: току якоря, скорости электродвигателя барабана, скорости транспортного средства, усилия натяжения промежуточного кабеля.

Обобщенная структурная схема такой системы представлена на рис. 7.

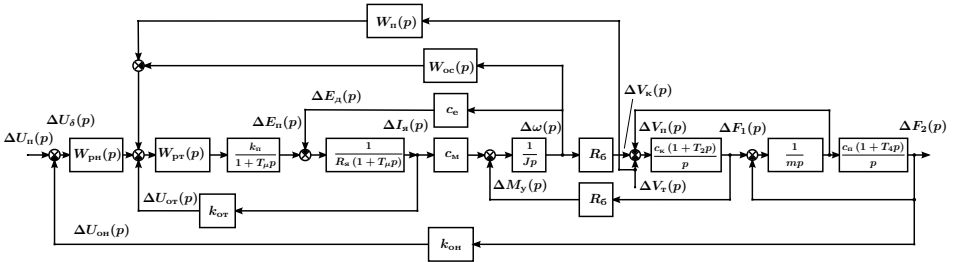


Рис. 7. Обобщенная структурная схема электропривода механизма натяжения.

На схеме обозначены: $W_{прт}(p)$, $W_{прп}(p)$ — передаточные функции регуляторов тока и натяжения; $W_{ос}(p)$, $W_{п}(p)$ — передаточные функции каналов связи по частоте вращения электродвигателя и скорости передвижения транспортного средства; c_e , $k_{от}$ — коэффициенты передачи по скорости и току якоря электродвигателя; $k_{ст}$, $k_{он}$ — коэффициенты передачи датчиков скорости транспортного средства и натяжения кабеля.

Регулятор тока выбран из условия стандартной настройки контура по условиям модульного оптимума. Вследствие высокого быстродействия контура тока, переходные характеристики системы с отрицательной обратной связью по току якоря практически совпадают с переходными характеристиками пружинного механизма натяжения.

Установлено, что на величину динамического «провала» силы натяжения промежуточной линии питания значительное влияние оказывает ускорение транспортного средства в начале разгона. Начальные ускорения будут наименьшими при разгоне по колебательно-затухающей программе по сравнению с экспоненциальной и линейной программами. Поэтому и падения усилий натяжения в первом случае наблюдаются наименьшими: $\Delta F_{2.1} = 5.5 \text{ Н}$, а при разгоне по аperiodической программе: $\Delta F_{2.2} = 8.5 \text{ Н}$.

Установлено, что полная инвариантность к изменению нормальной составляющей скорости транспортного средства обеспечивается в системе с каналом связи по этой составляющей и блоком дифференцирования четвертого порядка. С помощью метода частотных характеристик установлено, что частичная инвариантность обеспечивается в системе с блоком дифференци-

рования первого порядка

$$W_{\text{п}}(p) = \frac{T_{\text{д}i}p}{T_{\Phi}p + 1}, \quad i = 1, 2 \quad (11)$$

($T_{\text{д}1} = 0,063$ с – в системе с минимальными ПМН; $T_{\text{д}2} = 0,1$ с – в системе с максимальными ПМН; $T_{\Phi} = 0,001$ с).

Уточнение этих параметров производилось по результатам решения минимаксной задачи

$$\Delta F_2(t_{\text{д}i}^*, t_{\text{м}i}) = \min_{t_{\text{м}i} > 0} (\max \Delta F_2(T_{\text{д}i}, t_{\text{м}i})),$$

доставляющей минимальное значение максимального отклонения упругой силы в переходном процессе при разгоне транспортного средства. Значения максимальных отклонений усилий в переходном процессе (рис. 8) составили незначительную величину $\gamma_1 = 0,2$ Н при $T_{\text{д}1}^* = 0,12$ с и $\gamma_1 = 0,3$ Н при $T_{\text{д}2}^* = 0,043$ с.

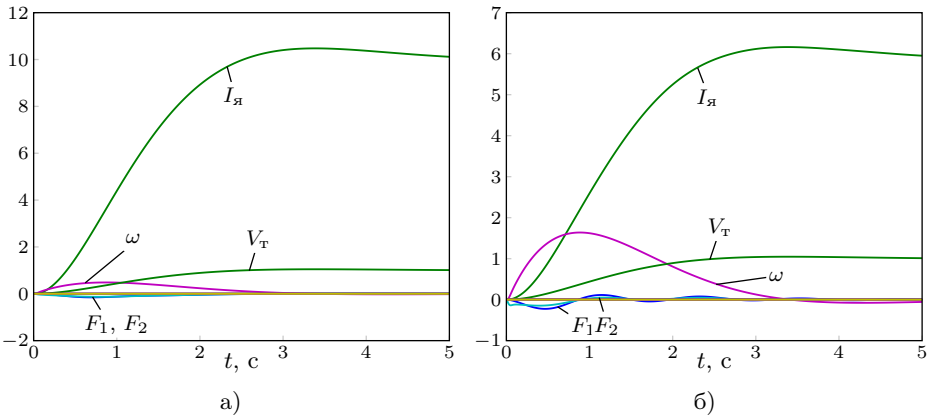


Рис. 8. Переменные в переходном процессе в системе с минимальными (а) и максимальными (б) ПМН при изменении скорости по колебательно затухающей программе: $I_{\text{я}}$ – А; $V_{\text{т}}$ – м/с; F_1, F_2 – Н.

Показано, что в системе управления электроприводом натяжения с обратными связями по току якоря и усилию натяжения показатели качества регулирования (рис. 9) достаточно хорошие.

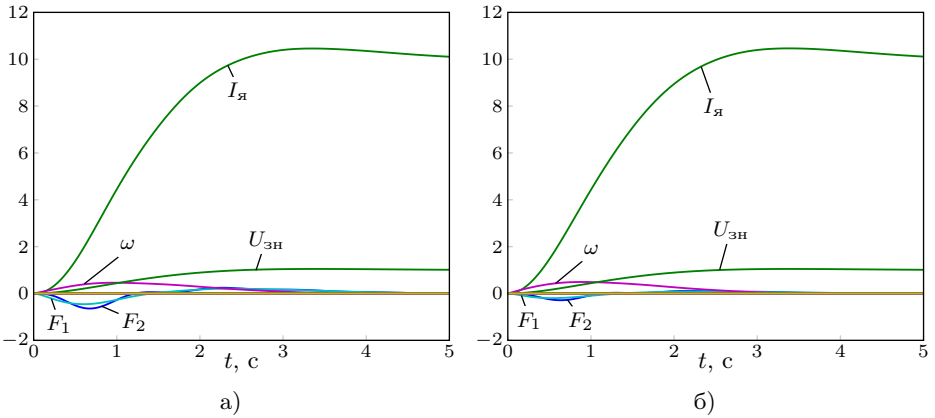


Рис. 9. Переходные процессы в системе с обратными связями по $I_{я}$ и F_2 при минимальных (а) и максимальных (б) ПМН и изменении скорости транспортного средства по колебательно-затухающей программе.

Параметры ПИД-регулятора натяжения выбирались с помощью метода частотных характеристик с последующим уточнением этих параметров по результатам решения минимаксной задачи

$$\Delta F_2(k_{\text{пер}}^*, T_{\text{пер}1}^*, T_{\text{пер}2}^*, t_m) = \min_{t_m > 0} (\max \Delta F_2(k_{\text{пер}}, T_{\text{пер}1}, T_{\text{пер}2}, t_m)),$$

$$|\Delta\varphi(\omega_{\text{ср}})| \geq 45^\circ.$$

Показано, что эта система относится к классу робастных систем, так как при изменении ее параметров ($0,0324 \text{ кг м}^2 \leq J \leq 0,177 \text{ кг м}^2$, $48 \text{ Н/м} \leq c_{\text{к}} \leq 10^4 \text{ Н/м}$, $0,5 \text{ 1/с} \leq k_{\text{пер}} \leq 1,5 \text{ 1/с}$, $0,027 \text{ с} \leq T_{\text{пер}2} \leq 0,036 \text{ с}$) она сохраняет необходимый запас устойчивости.

В четвертой главе рассмотрены результаты практической реализации и экспериментальных исследований характеристик системы управления электроприводом натяжения промежуточной линии питания, которая защищена патентом на изобретение.

По результатам диссертационной работы система управления электроприводом натяжения участка системы электроснабжения электрогрузчиков модели ЭП 103 КО, ЭП 202, ЭП 1616, ЕВ 525 была реализована на предприятиях г. Самары. Экспериментальные исследования подтверждают ее эффективность и достоверность теоретических выводов, полученных в диссертационной работе.

Заключение

В работе получены следующие основные результаты:

1. Существующие пружинные приводы, разомкнутые асинхронные электроприводы и замкнутые электроприводы постоянного тока с обратными связями по различным переменным без учета распределенности и переменности плотности массы элементов подвесной линии питания и без учета влияния разности высот точек подвеса промежуточной линии питания на величину ее жесткости не обеспечивают требуемого качества управления натяжением линии (плавности, колебательности и т.д.)

2. Разработана математическая модель подвесной линии как элемента объекта управления с распределенными параметрами, на основе которой построена структурная схема многомерного элемента механизма натяжения с входной переменной — силой натяжения и выходными переменными — отклонением подвесной линии питания от положения равновесия в дискретных точках. Установлена зависимость жесткости промежуточной линии от усилия натяжения, удаленности транспортного средства от подвесной линии и от разности высот точек подвеса промежуточной линии.

3. Разработана математическая модель электропривода натяжения со связями по току якоря, частоте вращения двигателя, скорости транспортного средства и усилию натяжения.

4. Разработан алгоритм управления усилием натяжения с целью стабилизации петли провиса промежуточной линии. Показано, что для обеспечения заданной погрешности стабилизации петли провиса в системе управления электроприводом натяжения требуется поддерживать программное усилие с меньшей погрешностью.

5. С целью повышения демпфирования механических колебаний дополнительно к отрицательной связи по току якоря предложено использовать положительную связь по скорости транспортного средства и отрицательную связь по усилию натяжения.

6. Электропогрузчики, оснащенные системой электроснабжения от промышленной электросети с электроприводом натяжения промежуточной линии питания внедрены и успешно работают на нескольких предприятиях г. Самары.

Основные положения и результаты опубликованы в следующих работах:

В изданиях по списку ВАК:

1. Котенев В. В., Котенев А. В. Оборудование для электроснабжения и управления электропогрузчиками // Электро- и теплотехнические процессы и установки. Саратов, 2003. С. 171–173.
2. Котенев В. В., Альмендеев А. А., Котенев В. И. Система централизованного электроснабжения цеховых и складских транспортных средств // Электромеханика. 2007. С. 79. Спецвыпуск.
3. Котенев В. В., Осипов В. С., Серюгин С. В., Котенев В. И. Динамика многомассового механизма натяжения промежуточной линии СЭС напольных транспортных средств // Вестник СамГТУ. 2009. № 3 (25). С. 172–178.
4. Котенев В. В., Осипов В. С., Серюгин С. В., Котенев В. И. Алгоритм управления усилием натяжения для стабилизации стрелы провиса участка кабельной линии электроснабжения напольных транспортных средств // Вестник СамГТУ. 2010. № 2 (26). С. 147–152.

В других изданиях:

5. Пат. 2185296 Российская Федерация, МПК⁷ В 60 L 9/00. Устройство для электроснабжения и управления безрельсовым транспортным средством; заявитель и патентообладатель В. В. Котенев, В. И. Котенев, И. А. Шайдуров, А. В. Котенев. — № 2000131771/28; заявл. 18.12.00; опубл. 20.07.02, Бюл. № 20. 22 с. 4 ил.
6. Котенев В. В., Альмендеев А. А., Котенев А. В., Котенев В. И. Электрооборудование для централизованного электроснабжения напольных транспортных средств // Сб. трудов междунар. научн. техн. конф. «Актуальные проблемы трибологии» / СамГТУ. Москва: Машиностроение, 2007. С. 54–60.
7. Котенев В. В., Альмендеев А. А., Котенев А. В., Котенев В. И. Анализ вязкого трения упругой механической части и синтез электропривода натяжения системы электроснабжения напольного транспортного средства // Сб. трудов междунар. научн. техн. конф. «Актуальные проблемы трибологии» / СамГТУ. Москва: Машиностроение, 2007. С. 23–27.

8. Котенев В. В., Серюгин С. В., Демидов Г. Л. Система управления натяжением СЭС напольных транспортных средств // Сб. тр. всероссийской науч. конф. молодых ученых «Наука, технология, инновации» / НГТУ. Новосибирск: 2008. С. 100–102.
9. Котенев В. В. Линия питания напольных транспортных средств как элемент механической части электропривода натяжения // Сб. трудов XII междунар. конф. «Электромеханика, электротехнология, электротехнические материалы и компоненты» / МЭИ. Крым, Алушта: 2008. С. 32–33.
10. Котенев В. В., Жупииков В. А. Электропривод натяжения силового кабеля СЭС напольного транспортного средства как системы управления с распределенными параметрами // Тезисы всесоюзной. науч. конф. / НГТУ. Новосибирск: 2008. С. 142–144.
11. Котенев В. В., Альмендеев А. А., Котенев В. И. Аппроксимация одномерного волнового уравнения // Тезисы XII междунар. науч. конф. по матем. методам в технике и технологиях / СГТУ. Саратов: 2008. С. 173–175.
12. Котенев В. В., Жупииков В. А., Котенев В. И. Стрела провиса и жесткость системы электроснабжения складского напольного транспорта // Тезисы II всероссийской науч.-техн. конф. «Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий». Уфа: 2009. С. 173–175.
13. Котенев В. В., Серюгин С. В., Котенев А. В. Программа задания натяжения кабеля системы электроснабжения напольных транспортных средств // Сборник междунар. науч.-техн. конф. студ., магистр., аспирантов по энергоэффективности и энергобезопасности производственных процессов. Тольятти: 2009. С. 83–84.

Личный вклад автора. В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежат: [1, 2, 5–9] — структурная и принципиальная схемы электропривода; [3, 11] — математические модели и переходные характеристики подвесной линии; [4, 13] — алгоритмы управления; [10, 12] — математические модели и переходные характеристики.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 212.217.04
ГОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»
(протокол № 11 от 26 октября 2010 г.)

Заказ № 47. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе.
ГОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»
Отдел типографии и оперативной печати
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244