

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <https://naukovedenie.ru/>

Том 9, №5 (2017) <https://naukovedenie.ru/vol9-5.php>

URL статьи: <https://naukovedenie.ru/PDF/60TVN517.pdf>

Статья опубликована 08.11.2017

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Шабо Камил Якуб Особенности функционирования многодвигательных электроприводов и их моделирование // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №5 (2017) <https://naukovedenie.ru/PDF/60TVN517.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 62

**Шабо Камил Якуб**

ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова»  
Технический институт (филиал), Россия, Нерюнгри  
Доцент кафедры «Электропривода и автоматизации производственных процессов»  
Кандидат технических наук  
E-mail: kamilshabo@rambler.ru

## Особенности функционирования многодвигательных электроприводов и их моделирование

**Аннотация.** многодвигательные электроприводы находят применение в транспортных системах непрерывного и циклического действия, в которых в качестве тягового органа используют упругие звенья резиновые или резинометаллические ленты, стальные канаты и др. Особенностью таких систем является то, что валы отдельных двигателей не связаны жестко друг с другом, а передают вращающий момент общему тяговому органу за счет сил трения. Если пренебречь другими скольжениями и удлинениями участков тягового органа между приводными барабанами, то систему многодвигательного электропривода можно рассматривать как передачу движущих моментов несколькими двигателями одному и тому же рабочему органу.

При структурном моделировании и исследовании многодвигательного электропривода должна решаться одна из главных задач – оптимальное распределение нагрузки между отдельными двигателями. При передаче движущих усилий за счет сил трения оптимальным режимом является обеспечение одинаковых запасов против скольжения всех приводных барабанов (шкивов) при любых по величине и знаку нагрузках.

При моделировании электропривода как сложной электромеханической системы на ЭВМ наиболее удобным и точным методом описания таких систем в дискретном виде является численно-аналитический метод.

**Ключевые слова:** моделирование; многодвигательный электропривод; упругие звенья; тяговый орган

Многодвигательные электроприводы находят применение в транспортных системах непрерывного и циклического действия, в которых в качестве тягового органа используют упругие звенья (резиновые или резинометаллические ленты, стальные канаты и др.). Особенностью таких систем является то, что валы отдельных двигателей не связаны жестко друг с другом, а передают вращающий момент общему тяговому органу за счет сил трения. Если пренебречь другими скольжениями и удлинениями участков тягового органа между приводными

барабанами, то систему многодвигательного электропривода можно рассматривать как передачу движущих моментов несколькими двигателями одному и тому же рабочему органу.

Наиболее характерной системой такого типа является статически неуравновешенная подъемная установка, состоящая из нескольких подъемных машин со шкивами трения, соединенных последовательно с общим тяговым органом, которому передается движение. Аналогичную пневматическую схему имеют и многоприводные конвейерные установки большой мощности.

Принципы построения систем управления установками такого типа имеют свои особенности, так как для обеспечения минимального упругого проскальзывания тягового крана необходимо применять независимый привод для каждого ведущего барабана. Наиболее сложной получается система управления многодвигательным электроприводом, работающем в реверсивном циклическом режиме с изменяющейся нагрузкой. Любые другие режимы являются его частными случаями [1, 2].

За оптимальный режим работы многоприводной системы такого типа принимают режим, который обеспечивает равенство запасов тяговых возможностей, т. е. поддерживается такое распределение общей передаваемой мощности, при котором увеличении нагрузки сверх допустимой приводит к пробуксовке всех барабанов одновременно. Оптимальные отношения тяговых усилий приводных барабанов должны быть обеспечены системой автоматического управления приводами на всем протяжении рабочего цикла, так как непосредственное изменение усилия в набегающей ( $S_{НБ}$ ) и сбегаящей ( $S_{СБ}$ ) ветку канатов представляет известные трудности, то отношение  $S_{НБ}/S_{СБ}$  целесообразно определять косвенно по общему тяговому усилию, которое находится через сумму токов приводных двигателей, сумму натяжения ветвей  $F_m = S_{НБ} + S_{СБ}$ . В скиповых подъемных установках с весовым дозированием полезного ископаемого  $F_0$  можно определять как разность весов набегающей и сбегаящей ветвей канатов с учетом динамических составляющих, непрерывно контролируя положения конечных грузов.

В установившихся режимах в процессе подъема (спуска) груза  $F_m = \text{const}$  и равно сумме весов поступательно движущихся звеньев. Из уравнений  $S_{НБ} + S_{СБ} = F_m$  и  $S_{НБ} - S_{СБ} = F_0$  определяется зависимость отношения  $S_{НБ}/S_{СБ}$  от  $F_0$ :

$$\frac{S_{НБ}}{S_{СБ}} = \frac{F_m + F_0}{F_m - F_0} \quad (1)$$

Зная отношение  $S_{НБ}/S_{СБ}$  и  $F_0$ , по известным формулам находят зависимости требуемых тяговых усилий каждого приводного барабана ( $F_1, F_2, F_3$ ) от общего тягового усилия  $F_0$ .

Для построения системы управления нужно усилие  $F_m$  определять с учетом динамических составляющих, а средние скорости всех приводных двигателей можно считать одинаковыми.

Поэтому должна быть применена комбинированная система управления с общей для всех приводов задающей моделью для управления скоростью (положением) и прямыми передачами по усилиям  $F_1, F_2, F_3$ , которые определяются как функции перемещения по общему тяговому усилию  $F_0$  в блоке формирования нагрузок (БФН). Текущее перемещение может определяться или в задающей модели, или непосредственным дискретным измерением действительного перемещения конечных грузов по магнитным меткам на канатах. Второй способ предпочтительнее, так как он исключает влияние проскальзывания канатов относительно ведущих шкивов, однако в нормальных условиях эксплуатации это преимущество не имеет существенного значения.

Поскольку  $S_{НБ}$  и  $S_{СБ}$  определяются по положению подъемных сосудов с учетом динамических составляющих, то общее тяговое усилие, а следовательно, и требуемые оптимальные движущие усилия  $F_1, F_2, F_3$  находятся легко. Сигналы пропорциональные  $F_1, F_2, F_3$  должны подаваться по прямым каналам и сравниваться с сигналами действительных движущих усилий, определяемых по токам двигателей, сигналы рассогласования поступают на соответствующие регуляторы тока через линейные регуляторы или ПИ-регуляторы.

Таким образом, управление осуществляется по двум независимым каналам: по заданному перемещению с помощью задающей модели (ЗМ) и заданным движущим усилиям, формируемых в БФН. ЗМ и БФН строятся на базе микроконтроллеров и микро-ЭВМ [3].

Задающая модель обеспечивает оптимальное измерение скорости в пределах заданных ограничений ускорения рывка, а БФН непрерывно поддерживает оптимальное распределение нагрузки на отдельные двигатели для каждого положения концевых грузов.

Система управления многоприводной установкой, как правило, получается сложной, особенно в отношении наладки. Поэтому выбор оптимальных параметров и проверку алгоритмов функционирования целесообразно производить методом моделирования ЭВМ. Учитывая, что все блоки формирования задающих воздействий являются устройствами дискретной техники, а системы регулирования приводов относятся к непрерывным системам, то, в инженерных расчетах удобно пользоваться численно-аналитическим методом исследования. Данный метод характеризуется тем, что в пределах одного шага интегрирования вычисления во всех линейных звеньях производятся по линейным зависимостям, полученным в результате решения дифференциальных уравнений при нулевых начальных условиях.[4,5] Связь между отдельными элементами осуществляется дискретно. Простота такого моделирования состоит в следующем: так как практически во всех системах управления электроприводами используются линейные элементы, описываемые уравнениями не выше второго порядка, то передаточные функции динамических звеньев могут рассматриваться как частные случаи выражения:

$$\frac{W_{\text{ВЫХ}}(p)}{U_{\text{ВХ}}(p)} = \frac{b_0 p^2 + b_1 p + b_2}{a_0 p^2 + a_1 p + a_2}$$

Откуда, представляя  $U_{\text{ВХ}}$  в виде дискретных ступенчатых сигналов на основании преобразования Карсона-Хевисайда уравнение в упрощенной форме при нулевых начальных условиях для одного периода квантования  $T$ :

$$U_{\text{ВЫХ}}(p) = \frac{U_{\text{ВХ}} \cdot (Ap^2 + Bp + C)}{a_0 p^2 + a_1 p + a_2}, \quad (2)$$

$$A = a_0 \cdot U_{\text{ВЫХ}}(0) + b_0 \cdot U_{\text{ВХ}}(0) - b_0 \cdot U_{\text{ВХ}}(0);$$

$$B = \alpha_0 \cdot \dot{U}_{\text{ВЫХ}}(0) + \alpha_1 \cdot U_{\text{ВЫХ}}(0) + b_1 \cdot U_{\text{ВХ}} - b_1 \cdot U_{\text{ВХ}}(0);$$

$$C = b_2 \cdot U_{\text{ВХ}};$$

$$U_{\text{ВХ}} = 0,5 \cdot (U_{\text{ВХ}}(N \cdot T) + U_{\text{ВХ}}[(N + 1) \cdot T]), N = 0,1,2 \dots$$

$U_{\text{ВЫХ}}(0)$  и  $\dot{U}_{\text{ВЫХ}}(0)$  – значения выходной переменной  $U_{\text{ВЫХ}}$  и её производные, полученные на предыдущем шаге [6].

Оригинал изображения (1) зависит от корней характеристического уравнения  $a_0 p^2 + a_1 p + a_2 = 0$  и для всех значений коэффициентов числителя и знаменателя приводится в справочниках по операционному исчислению.

Так если корни будут вещественными отрицательными,  $p_1 = -a, p_2 = -b$ , то:

$$U_{\text{ВЫХ}}(p) = \frac{U_{\text{ВХ}} \cdot (Ap^2 + Bp + C)}{a_0(p+a)(p+b)} \doteq U_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{U_{\text{ВХ}}}{a_0} \cdot \left[ \frac{C}{ab} + \frac{Aa^2 - Ba + C}{a(a-b)} \cdot e^{-at} - \frac{Ab^2 - Bb + C}{b(a-b)} \cdot e^{-bt} \right] \quad (3)$$

Корни комплексные с отрицательными вещественными частями  $p_{1,2} = -a \pm jb$ :

$$U_{\text{ВЫХ}}(p) = \frac{U_{\text{ВХ}}}{a} \cdot \frac{Ap^2 + Bp + C}{(p+a)^2 + b^2} \doteq U_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{U_{\text{ВХ}}}{a_0} \cdot \left\{ \frac{C}{a^2 + b^2} + \left[ \left( A - \frac{C}{a^2 + b^2} \right) \cdot \cos(bt) + \frac{1}{b} \cdot \left( B - Aa - \frac{Ca}{a^2 + b^2} \right) \cdot \sin(bt) \right] e^{-at} \right\} \quad (4)$$

Корни вещественные равные отрицательные,  $a_1^2 - 4a_0a_2 = 0$ ,

$$p_{1,2} = -a = \frac{-a_1^2}{2a_0};$$

$$U_{\text{ВЫХ}}(p) = \frac{U_{\text{ВХ}}}{a_0} \cdot \frac{(Ap^2 + Bp + C)}{(p+a)^2} \doteq U_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{U_{\text{ВХ}}}{a_0} \cdot \left\{ \frac{C}{a^2} + \left[ A - \frac{C}{a^2} - \left( Aa - B + \frac{C}{a} \right) \cdot t \right] \cdot e^{-at} \right\}. \quad (5)$$

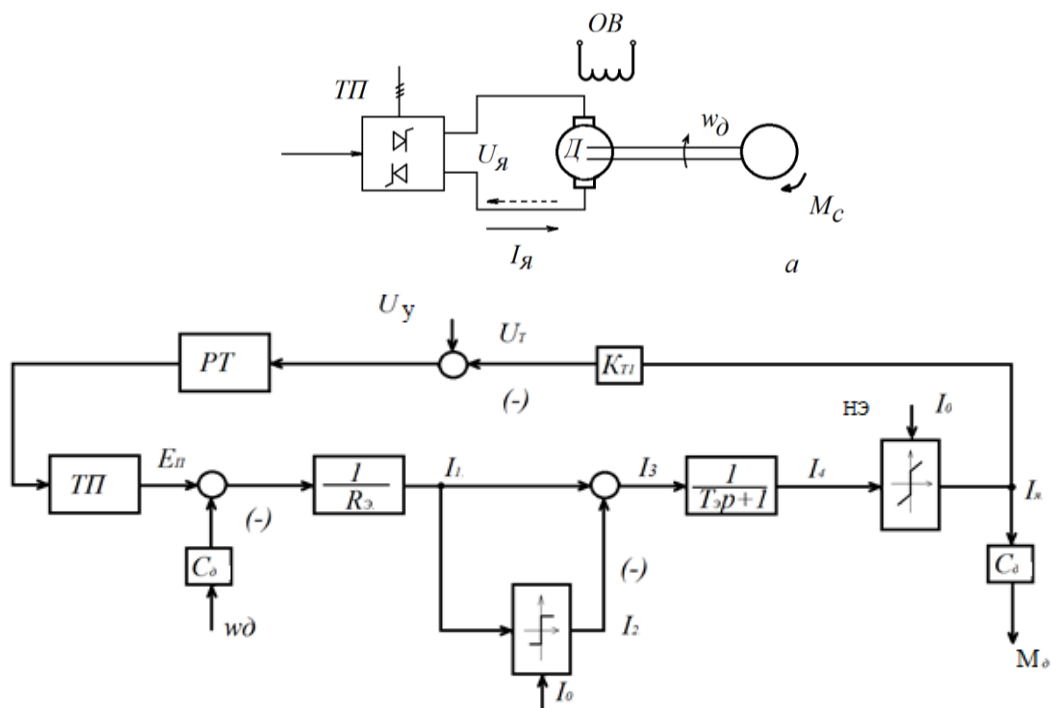
Входящие в коэффициенты  $A$  и  $B$  производные  $\dot{U}_{\text{ВЫХ}}(0)$  находятся дифференцированием функции  $U_{\text{ВЫХ}}(t)$  согласно зависимостям (2), (3) и (4). Например, для случая равных отрицательных корней:

$$\dot{U}_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{U_{\text{ВХ}}}{a_0} \cdot [B - 2aA + (Aa^2 - Ba + C) \cdot t] \cdot e^{-at}. \quad (6)$$

Аналогично описываются любые линейные звенья, что позволяет легко составлять схемы алгоритмов функционирования систем управления электроприводами, как динамическими системами.

Данный метод моделирования является численно-аналитическим, так как используются аналитические зависимости выходных переменных от выходных для линейных звеньев в период каждого шага, а сами связи между звеньями представляются в дискретной форме. Такой подход по моделированию делает весьма простым процесс исследования сложных систем электропривода и не требует от инженера специальной подготовки. Кроме того, существенно упрощается составление программы для расчетов на ЭВМ, особенно в тех случаях, когда система управления электроприводом представлена структурной схемой, а линейные звенья – передаточными функциями.

Рассмотрим схему силовой части электропривода, получающего питание от тиристорного преобразователя (рис. 1а). Структурная схема представлена на рисунке 1б.



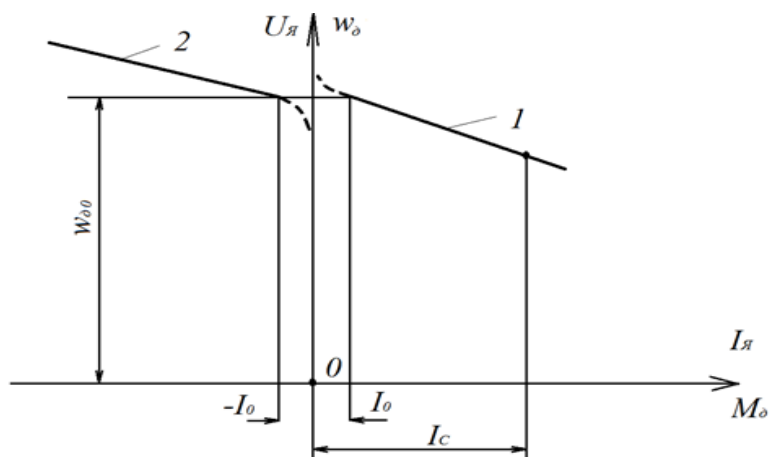
6

**Рисунок 1.** Схемы силовой части тиристорного электропривода (а) и контура тока (б)

Здесь  $E_{П}$  – ЭДС преобразователя (ТП);  $R_{\Sigma}$  – эквивалентное сопротивление якорной цепи;  $C_{д}$  – коэффициент пропорциональности ЭДС и момента двигателя;  $U_{y}$  – управляющий сигнал.

Нелинейный элемент НЭ воспроизводит действие устройства, переводящего двигателя из обычного режима в скользящий в области прерывистых токов (при  $I_{я} < I_0$ ). На рисунке 2 показаны механические характеристики двигателя, соответствующие работе преобразователя в выпрямительном и инверторном режимах [7, 8].

Устройство скользящего режима обеспечивает переключение преобразователя из выпрямительного режима (характеристика 1) в инверторный (характеристика 2) и обратно при  $|I_{я}| \leq I_0$ . В остальных режимах привод является обычной линейной системой. На рисунке  $\omega_{д.0}$  – условная частота вращения холостого хода.



**Рисунок 2.** Механические характеристики двигателя

В соответствии со структурной схемой переходные процессы, вызванные изменением воздействий  $E_{П}$  или статического момента сопротивления  $M_c$ , описываются следующими уравнениями в дискретной форме:

$$\left. \begin{aligned}
 I_1 &= \frac{E_{\Pi} - \omega_{\text{д}} \cdot C_{\text{д}}}{R_{\text{э}}}; \\
 I_2 &= \begin{cases} I_0 \text{ при } I_1 \geq 0 \\ -I_0 \text{ при } I_1 < 0 \end{cases}; \\
 I_3 &= I_1 - I_2; \\
 I_4 &= I_3 \cdot \left(1 - e^{-\frac{T}{T_{\text{э}}}}\right) + I_4(0) \cdot e^{-\frac{T}{T_{\text{э}}}}; \\
 I_{\text{я}} &= \begin{cases} I_0 + I_4 \text{ при } I_4 \geq 0 \\ -I_0 + I_4 \text{ при } I_4 < 0 \end{cases}; \\
 M_{\text{д}} &= I_{\text{я}} \cdot C_{\text{д}}; \\
 \omega_{\text{д}} &= \omega_{\text{д}}(0) + (M_{\text{дв}} - M_{\text{с}}) \cdot J_0^{-1} \cdot T
 \end{aligned} \right\} (7)$$

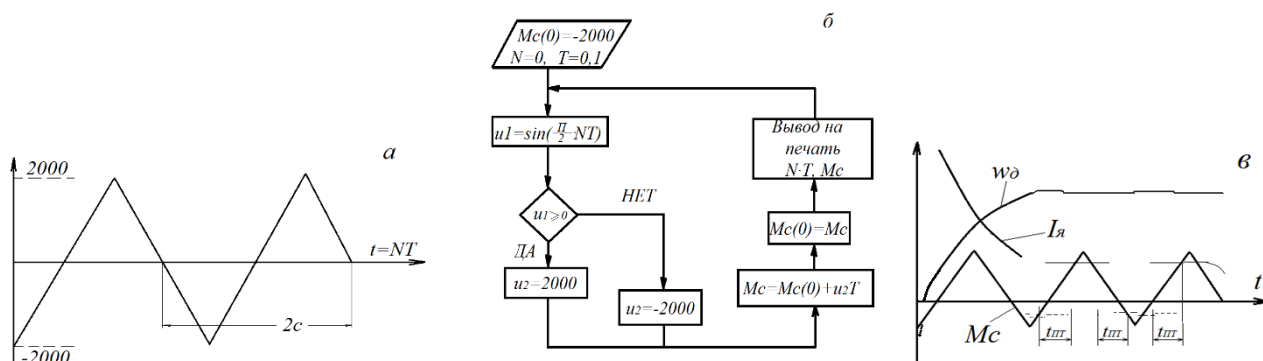
где:  $J_0$  – приведенный к валу двигателя (Д) момент инерции системы, включая рабочую машину (РМ) и передающие механизмы.

Для иллюстрации характера функционирования рассматриваемой схемы при переходе с обычного режима в скользящий и обратно исследуем математическую модель (7) при следующих значениях параметров и внешних воздействиях:  $I_0 = 100$ ;  $R_{\text{э}} = 0,05$ ;  $C_{\text{д}} = 9,5$ ;  $T_{\text{э}} = 0,2$ ;  $J_0 = 2500$ ;

$$E_{\Pi} = \begin{cases} 120 \text{ НТ при } NT \leq 5 \\ 0 \text{ при } NT > 5. \end{cases}$$

Примем, что момент  $M_{\text{с}}$  изменяется в соответствии с графиком, показанным на рисунке 3а.

Программно функцию  $M_{\text{с}}(t)$  можно реализовать по алгоритму, приведенному на рисунке 3в. Периоды  $t_{\text{пр}}$  соответствуют работе привода в режиме прерывистых токов.



**Рисунок 3.** График (а) и структурная схема алгоритма (б) исследования переходных процессов в области прерывистых токов (в)

Исходя из выше изложенного в системах управления многодвигательными электроприводами должна решаться одна из главных задач – оптимальное распределение нагрузки между отдельными двигателями. При передаче движущих усилий за счет сил трения оптимальным режимом является обеспечение одинаковых запасов против скольжения всех приводных барабанов (шкивов) при любых по величине и знаку нагрузках.

При моделировании электропривода как сложной электромеханической системы на ЭВМ наиболее удобным и точным методом описания таких систем в дискретном виде является численно-аналитический метод.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кувшинов А., Греков Э. Теория электропривода: учебное пособие, Ч. часть 2. Регулирование координат электропривода. Оренбург: ОГУ, 2014.
2. Борцов Ю. А., Шестаков В. М. Коррекция систем подчиненного регулирования с упругими механическими передачами с помощью активных фильтров // Изв. ВУЗов. Энергетика. – 1972. – N 8. – С. 30-35.
3. Комбинированная система управления многодвигательным электроприводом с общей задающей моделью / Шабо Камил; Нац. техн. ун-т Украины "Киев. политехн. ин-т". – Киев, 1996. – 10 с. – Деп. в ГНТБ Украины, N 707 – Ук96.
4. Шабо Камил. Системы оптимального управления позиционным тиристорным электроприводом с многоканальной задающей моделью. – Нерюнгри, 2017. – 56 с. – ТИ (ф) СВФУ
5. Родькин Д. И., Крутко В. Т., Щука Ю. В. Оптимизация режимов работы многодвигательного привода мощных конвейеров в системе асинхронно-вентильного каскада // Электротехническая промышленность. Электропривод. – 1973. – Вып. 421. – С. 11-13.
6. Дубков А. А., Агудов Н. В. Преобразование Лапласа: Учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2016. – 36 с.
7. Мещеряков В. Н. Инверторы и преобразователи частоты для систем электропривода переменного тока. Липецк: Липецкий государственный технический университет, ЭБК АСВ, 2014. – 90 с.
8. Ветров В. И. Электромеханические преобразователи, диагностика и защита. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2013. – 259 с.

**Chabo Kamil Yakoub**

North-Eastern federal university named after M.K. Ammosov  
Technical institute (branch), Russia, Neryungri  
E-mail: kamilshabo@rambler.ru

## **Features of the functioning of multi-motor electric drives and their modeling**

**Abstract.** Multi-motor electric drives are used in transport systems of continuous and cyclic action, in which elastic links are used as rubber or rubber bands, steel ropes, etc. The peculiarity of such systems is that the shafts of individual motors are not rigidly connected to each other but are transmitted. The torque to the common traction body is due to frictional forces. If other slips and elongations of the traction body sections between the drive drums are neglected, the multi-motor drive system can be regarded as the transmission of driving moments by several motors to the same operating element.

Structural modeling and research of a multi-motor electric drive should solve one of the main tasks – optimal load distribution between individual engines. When transmitting driving forces due to frictional forces, the optimal mode is to ensure the same reserves against sliding of all driving drums (pulleys) under any load and in magnitude.

When modeling an electric drive as a complex electromechanical system on a computer, the most convenient and accurate method for describing such systems in a discrete form is the numerical-analytical method.

**Keywords:** modeling; multi-motor drive; elastic links; traction body