

УДК 681.51

**И.А. Радионов****ПРИМЕНЕНИЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА ПРИ  
ФОРМИРОВАНИИ МОМЕНТА В СИСТЕМЕ  
«ТЯГОВЫЙ ПРИВОД – КОЛЕСНАЯ ПАРА – ПУТЬ»**

*Рассмотрена проблема формирования управляющего воздействия в системе «тяговый привод – колесная пара – путь». Формирование момента тягового привода должно осуществляться с учетом момента сцепления колесной пары с поверхностью рельса, но данную характеристику не представляется возможным измерить. В связи с этим в статье используется асимптотический наблюдатель для оценки момента сцепления. Для решения указанной задачи предлагается использовать методы и принципы синергетической теории управления. Данная теория базируется на принципах направленной самоорганизации и управляемой декомпозиции нелинейных систем.*

*Синергетический подход; тяговый привод; момент сцепления.*

**I.A. Radionov****APPLICATION OF SYNERGETICS APPROACH TO FORMING OF TORQUE  
IN THE SYSTEM “TRACTION DRIVE – WAGE WHEELS – TRACK”**

*In this article we explore the problem of control action design for the system “traction drive – wage wheels – track”. For forming of traction motor torque we should use the information about torque of wage wheels coupling with the surface but we can't measure this value. So, we propose to use the asymptotical observer for evaluation of coupling torque. To solve this problem we propose to use the methods and principles of synergetics control theory. This theory is based on principles of directed self-organization and control decomposition of nonlinear system.*

*Synergetics approach; traction drive; coupling torque.*

Опыт, накопленный в процессе производства и эксплуатации электровозов с бесколлекторным тяговым приводом, а также совершенствование полупроводниковой электроники подвели к необходимости использования в качестве тяговых электроприводов – асинхронные. Современные микропроцессорные устройства позволяют строить сложные иерархические системы, на каждом уровне которых задаются управляющие воздействия и производится оценка неизмеряемых переменных. Проблема синтеза алгоритмов управления в системах подобного типа может быть успешно решена при использовании синергетического подхода и разработанного в его рамках метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), базирующегося на принципах направленной самоорганизации и управляемой декомпозиции нелинейных систем [1–5].

В статье предлагается рассмотреть проблему формирования момента тягового привода в системе «тяговый привод – колесная пара – путь». На большинстве электровозов момент с одного двигателя передается через редуктор только на одну ось колесной пары (КП), т.е. количество тяговых приводов соответствует количеству КП.

Рассмотрим схематичное представление системы «тяговый привод – колесная пара – путь» [6]. На рис.1 обозначены:  $M_T$  – тяговый момент электропривода;  $M_{сц}$  – момент сцепления колеса с поверхностью рельса;  $J_r$ ,  $J_k$  – момент инерции тягового электропривода (ТЭП) относительно оси вращения и КП относительно оси вращения соответственно;  $\varphi_r$ ,  $\varphi_k$  – угол поворота ротора и КП относительно оси вращения соответственно;  $\omega_r$ ,  $\omega_k$  – угловая скорость ротора и КП со-

ответственно;  $X_k$ ,  $V_k$  – перемещение КП и скорость этого перемещения вдоль направления движения локомотива;  $c_x$  – жесткость продольной связи КП с тележкой;  $c_m$  – жесткость связи КП с ТЭП;  $b_x$  – коэффициент демпфирования продольной связи КП с тележкой;  $b_m$  – коэффициент демпфирования связи КП с ТЭП;  $m_k$  – масса колесной пары;  $\Pi(t)$  – нагрузка от КП на путь.

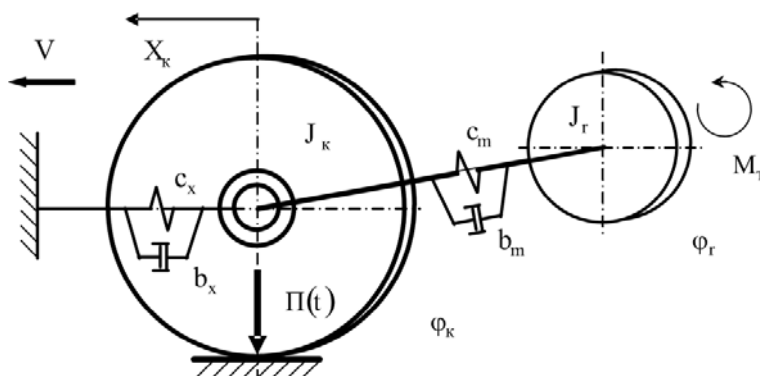


Рис. 1. Схема системы «тяговый привод – колесная пара – путь»

Математическая модель объекта регулирования представляет собой систему дифференциальных уравнений [6]

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_r}{dt} J_r &= M_T - b_m(\omega_r - \omega_k) - c_m(\varphi_r - \varphi_k); \\ \frac{d\omega_k}{dt} J_k &= -M_{cy} - b_m(\omega_k - \omega_r) - c_m(\varphi_k - \varphi_r); \\ \frac{dV_k}{dt} m_k &= M_{cy} - b_x V_k - c_x X_k; \\ \frac{d\varphi_k}{dt} &= \omega_k; \quad \frac{d\varphi_r}{dt} = \omega_r; \quad \frac{dX_k}{dt} = V_k. \end{aligned} \quad (1)$$

Формирование момента тяги  $M_T$  должно производиться с учетом качества сцепления колес с поверхностью рельса. В идеале, при поддержании заданной величины линейной скорости движения состава или частоты вращения КП, момент тяги  $M_T$  и момент сцепления  $M_{cy}$  должны быть эквивалентны вне зависимости от изменения момента сцепления. Данный подход позволяет избежать боксования КП при указанном режиме движения. Так как момент сцепления  $M_{cy}$  не представляется возможным измерить, построим систему оценки данной переменной (наблюдатель) с использованием метода, описанного в работе [5].

В исходной модели (1) вместо характеристики  $M_{cy}$  подставим переменную  $y$  и дополним систему уравнений соотношением

$$\frac{dy}{dt} = 0. \quad (2)$$

Этот шаг необходим как на этапе синтеза закона управления, так и на этапе построения наблюдателя момента сцепления.

Принцип синтеза наблюдателя подробно описан в [5]. Для нашего случая выражение, оценивающее переменную  $y$ , будет иметь вид

$$\begin{aligned}\frac{dz}{dt} &= l_1 z + l_1^2 m_k R_k V_k + l_k R_k (b_x V_k + c_k X_k); \\ \hat{y} &= -l_1 m_k R_k V_k - z.\end{aligned}\quad (3)$$

Уравнение (3) при  $l_1 < 0$  обеспечивает асимптотическое отслеживание переменной  $y$ .

В соответствии с методом АКАР [1–5] проведем синтез системы управления рассматриваемого объекта (1), (2). Целью управления является поддержание заданной скорости вращения КП  $\omega_k$ .

Для нахождения законов управления введем первую целевую функцию

$$\psi_1 = \omega_r - \phi_1, \quad (4)$$

удовлетворяющую функциональному дифференциальному уравнению

$$\frac{d\psi_1}{dt} + \lambda_1 \psi_1 = 0, \quad (5)$$

где  $\lambda_1 > 0$ . Выбираем именно такой инвариант вследствие того, что в системе присутствует только один канал регулирования – момент тяги  $M_T$ . Используя его, мы можем повлиять на угловую скорость КП  $\omega_k$  через переменную  $\omega_r$ .

Из совместного решения системы уравнений (4), (5) с учетом модели синтеза (1), (2) получим выражение для базового закона управления:

$$M_T = J_r \left[ \frac{d\phi_1}{dt} - \lambda_1 (\omega_r - \phi_1) \right] + b_m (\omega_r - \omega_k) + c_m (\phi_r - \phi_k). \quad (6)$$

При попадании изображающей точки системы в окрестность многообразия  $\psi_1 = 0$  в замкнутой системе (1), (2), (6) происходит динамическая декомпозиция. Ее поведение будет описываться системой дифференциальных уравнений (1), (2), с исключенным первым уравнением в (1). При этом вместо координаты  $\omega_r$  подставляется переменная  $\phi_1$ . На основе этой модели произведем синтез «внутреннего» закона управления  $\phi_1$  для рассматриваемого объекта.

Введем вторую макропеременную

$$\psi_2 = \omega_k - \omega_{k0},$$

удовлетворяющую функциональному уравнению

$$\frac{d\psi_2}{dt} + \lambda_2 \psi_2 = 0,$$

где  $\lambda_2 > 0$ . Аналогично найдем выражение для «внутреннего» управления. В конечном выражении подставим вместо переменной  $y$  ее оценку  $\hat{y}$ :

$$\phi_1 = \frac{1}{b_m} \left[ \hat{y} + b_m \omega_k + c_m (\phi_r - \phi_k) - \lambda_2 J_k (\omega_k - \omega_{k0}) \right]. \quad (7)$$

Выражения (6), (7) представляют собой искомый закон управления моментом тяги  $M_T$  в системе «тяговый привод – колесная пара – путь».

Моделирование рассматриваемой системы (1) проводилось при следующих значениях коэффициентов:  $\omega_{k0} = 32 \text{ рад/с}$ ;  $l_1 = -20$ ;  $R_k = 0,625 \text{ м}$ ;  $J_r = 1200 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $J_k = 400 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $m_k = 3300 \text{ кг}$ ;  $c_m = 3500 \text{ кН} \cdot \text{м}$ ;  $b_m = 10 \text{ кН} \cdot \text{с} \cdot \text{м}$ ;  $c_x = 200000 \text{ кН/м}$ ;  $b_x = 70 \text{ кН} \cdot \text{с/м}$ ;  $\lambda_1 = \lambda_2 = 2$ . Начальные угловые скорости вращения  $\omega_k$  и  $\omega_r$  равны  $16 \text{ рад/с}$ . Момент сцепления выбирается как кусочно-постоянная функция

$$M_{сц} = \begin{cases} 30000 \text{ Н} \cdot \text{м} & \text{при } 0 \leq t < 5 \text{ с}, \\ 15000 \text{ Н} \cdot \text{м} & \text{при } 5 \leq t < 8 \text{ с}, \\ 20000 \text{ Н} \cdot \text{м} & \text{при } t \geq 8 \text{ с}. \end{cases}$$

Результаты моделирования системы (1), (3), (6), (7) представлены на рис. 2–7.

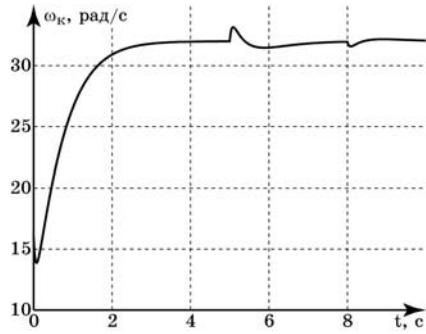


Рис. 2. Угловая скорость вращения КП

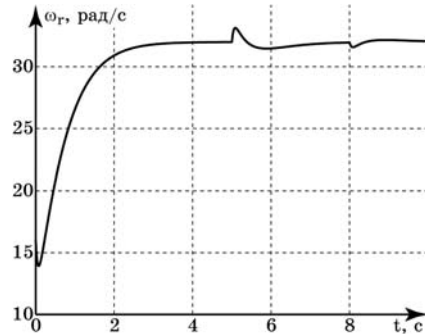


Рис. 3. Угловая скорость вращения ротора

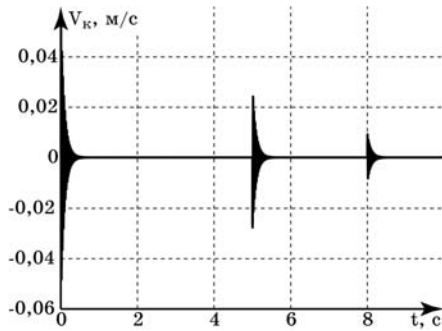


Рис. 4. Изменение координаты Vк

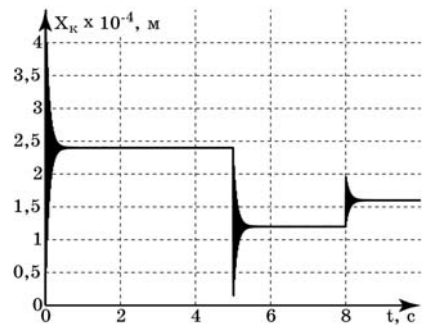


Рис. 5. Изменение координаты Xк

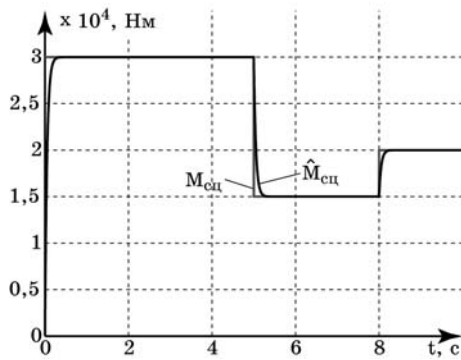


Рис. 6. Эталонное и оцениваемое значение момента сцепления

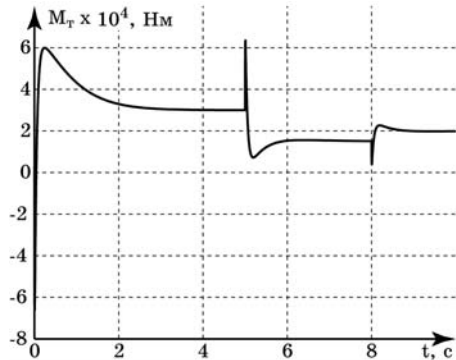


Рис. 7. График изменения момента тяги

Из результатов моделирования можно сделать вывод о том, что наблюдатель момента сцепления  $M_{сц}$  способен реагировать на изменение указанной величины и оценивать ее вполне адекватно, так как выходит на требуемое значение менее чем за секунду, что вполне подходит для систем подобного класса. Это позволяет подстраивать момент тяги  $M_T$  при меняющемся коэффициенте сцепления колес с поверхностью рельса. Что, в свою очередь, помогает избежать боксования при движении состава с постоянной скоростью.

Применение синергетической теории управления позволяет успешно осуществлять синтез систем управления нелинейными динамическими объектами. Так как в основе синергетического подхода лежит принцип асимптотического перехода от одного инвариантного многообразия к другому с последовательным понижением размерности многообразия, полученная система обладает рядом преимуществ, по сравнению с традиционной. К числу которых относится асимптотическая устойчивость синтезированной системы во всей области изменения координат, инвариантность системы к действию внешних возмущающих воздействий и грубость переходных процессов системы к флуктуации погрешностей в объекте.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колесников А.А. Аналитическое конструирование нелинейных агрегированных регуляторов по заданной совокупности инвариантных многообразий. I. Скалярное управление // Известия вузов. Электромеханика. – 1987. – № 3.
2. Колесников А.А. Синергетическая теория управления: концепции, методы, тенденции развития // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2001. – № 5 (23). – С. 7-27.
3. Колесников А.А. Синергетическая концепция системного синтеза: единство процессов самоорганизации и управления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2006. – № 6 (61). – С. 10-38.
4. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
5. Современная прикладная теория управления: синергетический подход в теории управления / Под ред. А.А. Колесникова. Ч. II. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 559 с.
6. Разработка комплекса предотвращения боксования: отчет о НИР (заключ.) / Рост. гос. ун-т. пут. сообщ. (РГУПС); рук. Коронец П.А. – Ростов-на-Дону, 2000. – 53 с. – № ГР 01.02.00 10888. – Инв. № 02.20.00 05443.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.М. Першин.

**Радионов Иван Алексеевич** – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: radionov87@gmail.com; 347928, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел.: 88634360707; кафедра синергетики и процессов управления; аспирант.

**Radionov Ivan Alekseevich** Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: radionov87@gmail.com; 2, Chekhov street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634360707; the department of synergetics and control; postgraduate student.