

УДК 681.51

Г.Е. Веселов, И.А. Радионов**СИНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ**

Рассмотрена проблема управления асинхронным тяговым двигателем. Регулятор синтезируется в системе, включающей тяговый привод, колесную пару и поверхность рельса. Формирование момента тягового привода должно осуществляться с учетом момента сцепления колесной пары с поверхностью рельса. Такая постановка задачи позволяет построить регулятор, своевременно адаптирующийся к изменению момента сцепления колесной пары с поверхностью рельса, тем самым естественным образом исключается боксование при поддержании постоянной скорости движения состава. В связи с тем, что момент сцепления не представляется возможным измерить, в статье используется асимптотический наблюдатель для оценки данной характеристики. Для решения указанных задач предлагается использовать методы и принципы синергетической теории управления.

Синергетический подход; тяговый привод; момент сцепления.

G.E. Veselov, I.A. Radionov**SYNERGETIC SYSTEM CONTROL OF TRACTION DRIVE**

In this article we explore the problem of control action design for the asynchronous traction drive. This system include traction drive, wage wheels and surface of track. For forming of traction motor torque we should use the information about torque of wage wheels coupling with the surface. This formulation of the problem can give us some advantages. If we know the information about torque of wage wheels coupling with the surface, our system can adapt to it. And in the case of motion with constant velocity, we can avoid slipping. But we can't measure this value. So, we propose to use the asymptotical observer for evaluation of coupling torque. To solve these problems we use the methods and principles of synergetics control theory.

Synergetics approach; traction drive; coupling torque.

Применение асинхронного электропривода в качестве тягового привода является перспективным направлением при проектировании современных электровозов и тепловозов. Несмотря на высокий уровень развития микропроцессорных систем, проблема управления подобным классом объектов остается открытой. При построении регулятора, в данном случае нужно рассматривать систему, включающую не только тяговый привод, но и колесную пару (КП) в контакте с поверхностью рельса. Сложность управления заключается в невозможности измерения момента сцепления КП с поверхностью рельса, что приводит к возникновению боксования при изменении качества сцепления.

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 [1–4].

Рассмотрим схематичное представление системы «тяговый привод – колесная пара – путь» (рис. 1) [5]. На рис. 1 обозначены: M_T – тяговый момент электропривода; $M_{сц}$ – момент сцепления колеса с поверхностью рельса; J_r , J_k – момент инерции ротора асинхронного тягового двигателя (АТД) и КП соответст-

венно; φ_r, φ_k – угол поворота ротора и КП относительно оси вращения соответственно; ω_r, ω_k – угловая скорость ротора и КП соответственно; 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 АД; b_x – коэффициент демпфирования продольной связи КП с тележкой; b_m – коэффициент демпфирования связи КП с АД; m_k – масса колесной пары; $\Pi(t)$ – нагрузка от КП на путь.

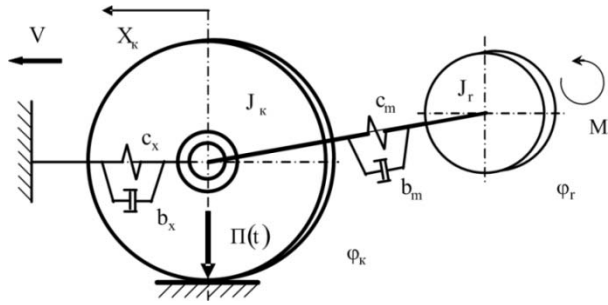


Рис. 1. Схема системы «тяговый привод – колесная пара – путь»

Математическая модель объекта регулирования представляет собой систему дифференциальных уравнений [5–7].

$$\begin{aligned}
 \frac{d\varphi_k}{dt} &= \omega_k; & \frac{d\varphi_r}{dt} &= \omega_r; & \frac{dX_k}{dt} &= V_k; \\
 \frac{d\omega_k}{dt} J_k &= -M_{cy} - b_m(\omega_k - \omega_r) - c_m(\varphi_k - \varphi_r); \\
 \frac{dV_k}{dt} m_k &= M_{cy} - b_x V_k - c_x X_k; & \frac{d\psi_r}{dt} &= \frac{r_r L_m}{L_r} i_{sx} - \frac{r_r}{L_r} \psi_r; \\
 \frac{d\omega_r}{dt} J_r &= \frac{pmL_m}{2L_r} \psi_r i_{sy} - b_m(\omega_r - \omega_k) - c_m(\varphi_r - \varphi_k); \\
 \frac{di_{sx}}{dt} &= -L^* i_{sx} + \omega_r i_{sy} + \frac{r_r L_m}{L_r} \frac{i_{sy}^2}{\psi_r} + \frac{L_m r_r}{L_r L} \psi_r + \frac{L_r}{L} u_{sx}; \\
 \frac{di_{sy}}{dt} &= -L^* i_{sy} - \omega_r i_{sx} - \frac{r_r L_m}{L_r} \frac{i_{sx} i_{sy}}{\psi_r} - \frac{L_m}{L} \omega_r \psi_r + \frac{L_r}{L} u_{sy},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где u_{sx}, u_{sy} и i_{sx}, i_{sy} – проекции напряжения и тока статора на оси вращающейся системы координат; ψ_r – модуль результирующего вектора потокосцепления ротора; L_s, L_r, L_m – собственные и взаимная индуктивности обмоток, а r_s, r_r – их активные сопротивления; $L = L_s L_r - L_m^2$; $L^* = (r_r L_m^2 + r_s L_r^2) / (L_r L)$. Математическая модель асинхронного двигателя записана в системе координат, ориентированной по направлению вектора потокосцепления ротора.

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. Так как момент сцепления M_{cy} не представляется возможным измерить, необходимо выполнить процедуру синтеза системы оценки данной переменной (наблюдателя) с использованием синергетического метода синтеза адаптивных систем управления [1].

Опуская саму процедуру синтеза наблюдателя, приведем конечные уравнения, полученные для оценки момента сцепления:

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

Уравнение (2) при $l_1 < 0$ обеспечивает асимптотическое отслеживание момента сцепления M_{cy} .

Далее перейдем к процедуре синтеза регулятора. В соответствии с методом АКАР [1–4] проведем синтез системы управления рассматриваемого объекта (1). Целью управления является поддержание заданной скорости вращения КП $\omega_k = \omega_{k0}$ и постоянства потокосцепления ротора $\psi_r = \psi_{r0}$ [6, 7].

Для нахождения законов управления введем первую пару макропеременных

$$\psi_1 = i_{sx} - \phi_1; \quad \psi_2 = i_{sy} - \phi_2, \quad (3)$$

удовлетворяющую функциональным дифференциальным уравнениям

$$\frac{d\psi_1}{dt} + \lambda_1 \psi_1 = 0; \quad \frac{d\psi_2}{dt} + \lambda_2 \psi_2 = 0, \quad \lambda_1, \lambda_2 > 0. \quad (4)$$

Из совместного решения системы уравнений (3), (4) с учетом модели (1) получим выражения для базового закона управления:

$$\begin{aligned} u_{sx} &= \frac{L}{L_r} \left[L^* i_{sx} - \omega_r i_{sy} - \frac{r_r L_m}{L_r} \left(\frac{i_{sy}^2}{\psi_r} - \frac{\psi_r}{L} \right) + \frac{d\phi_1}{dt} - \lambda_1 (i_{sx} - \phi_1) \right]; \\ u_{sy} &= \frac{L}{L_r} \left[L^* i_{sy} + \omega_r i_{sx} + \frac{r_r L_m i_{sx} i_{sy}}{L_r \psi_r} + \frac{\psi_r \omega_r L_m}{L} + \frac{d\phi_2}{dt} - \lambda_2 (i_{sy} - \phi_2) \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

При попадании изображающей точки (ИТ) системы в окрестность многообразия $\psi_1 = 0$, $\psi_2 = 0$ в замкнутой системе (1), (5) происходит динамическая декомпозиция. Ее поведение будет описываться системой дифференциальных уравнений (1), с исключенными двумя последними уравнениями. При этом вместо координат i_{sx} и i_{sy} подставляются переменные ϕ_1 и ϕ_2 . На основе этой модели произведем синтез «внутренних» законов управления ϕ_1 и ϕ_2 для рассматриваемого объекта.

Введя вторую совокупность макропеременных $\psi_3 = \psi_r - \psi_0$ и $\psi_4 = \omega_r - \phi_3$, получим выражения для «внутренних» управлений:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \frac{L_r}{r_r L_m} \left[\frac{\psi_r}{Tr} - \lambda_3 (\psi_r - \psi_{r0}) \right]; \\ \phi_2 &= \frac{2L_r}{mp L_m \psi_r} \left[J_r \left(\frac{d\phi_3}{dt} - \lambda_4 (\omega_r - \phi_3) \right) + b_m (\omega_r - \omega_k) + c_m (\phi_r - \phi_k) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Согласно методу АКАР, в системе произойдет вторая динамическая декомпозиция при попадании ИТ системы в окрестность пересечения многообразий $\psi_3 = 0$ и $\psi_4 = 0$. В качестве декомпозированной модели необходимо рассматривать первые пять уравнений системы (1), заменив в них ω_r на ϕ_3 .

Введем последнюю целевую функцию $\psi_5 = \omega_k - \omega_{k0}$ и найдем уравнение для «внутреннего» управления ϕ_3 . В конечном выражении подставим вместо момента сцепления $M_{сц}$ его оценку $\hat{M}_{сц}$:

$$\phi_3 = \frac{1}{b_m} \left[\hat{M}_{сц} + b_m \omega_k + c_m (\phi_k - \phi_r) - \lambda_5 J_k (\omega_k - \omega_{k0}) \right]. \quad (7)$$

Выражения (5)–(7) представляют собой искомый закон управления в системе «тяговый привод – колесная пара – путь».

Далее приведем результаты моделирования системы (1), (5), (6), (7). Моделирование проводилось при параметрах системы из [5, 8] и параметрах регулятора $\omega_{k0} = 32 \text{ рад/с}$; $\psi_{r0} = 0,987 \text{ Вб}$; $l_1 = -20$; $\lambda_1 = \lambda_2 = 1/T_s$; $\lambda_3 = \lambda_4 = 1/T_r$; $\lambda_5 = 1000/J_k$. При моделировании предполагалось, что момент сцепления изменял свое значение как кусочно-постоянная функция

$$M_{сц} = \begin{cases} 8000 \text{ Н} \cdot \text{м} & \text{при } 0 \leq t < 5 \text{ с}, \\ 4000 \text{ Н} \cdot \text{м} & \text{при } 5 \leq t < 8 \text{ с}, \\ 7000 \text{ Н} \cdot \text{м} & \text{при } t \geq 8 \text{ с}. \end{cases}$$

Результаты моделирования системы (1), (5), (6), (7) представлены на рис. 2–5.

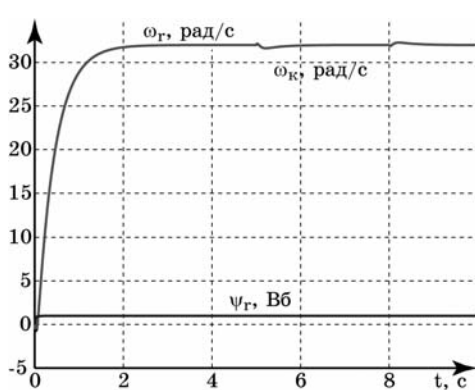


Рис. 2. Изменение ω_r , ω_k , ψ_r

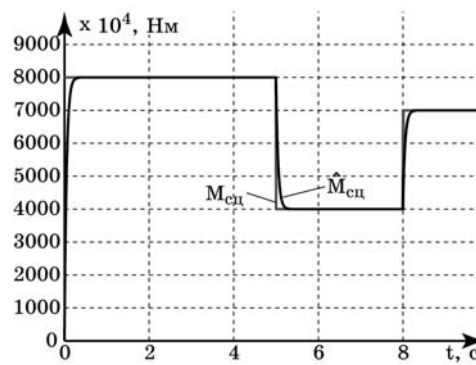
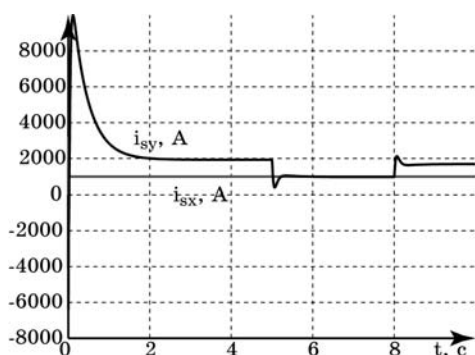
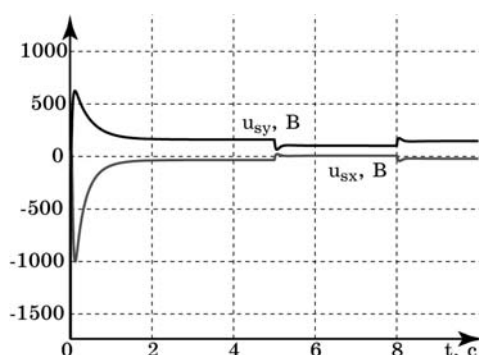


Рис. 3. Изменение момента сцепления и его оценки

Рис. 4. Изменение i_{sx} и i_{sy} Рис. 5. Изменение u_{sx} и u_{sy}

Из результатов моделирования можно сделать вывод о выполнении требуемых технологических инвариантов: стабилизации угловой скорости КП и потокосцепления ротора. Система оценки момента сцепления достаточно адекватно реагирует на его изменение, что позволяет подстраивать момент тяги при меняющемся коэффициенте сцепления колес с поверхностью рельса. Что, в свою очередь, помогает избежать боксование при движении состава с постоянной скоростью.

Применение синергетической теории управления позволяет успешно осуществлять синтез систем управления данным классом объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колесникова А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
2. Колесников А.А. Синергетическая концепция системного синтеза: единство процессов самоорганизации и управления // Известия ТРТУ. – 2006. – № 6 (61). – С. 10-38.
3. Колесников А.А. Аналитическое конструирование нелинейных агрегированных регуляторов по заданной совокупности инвариантных многообразий. I. Скалярное управление // Электромеханика. – 1987. – № 3.
4. Колесников А.А. Синергетическая теория управления: концепции, методы, тенденции развития // Известия ТРТУ. – 2001. – № 5 (23). – С. 7-27.
5. Разработка комплекса предотвращения боксования: отчет о НИР (заключ.) / Рост. гос. ун-т. пут. сообщ. (РГУПС); рук. Коропец П.А. – Ростов-на-Дону, 2000. – 53 с. – № ГР 01.02.00 10888. – Инв. № 02.20.00 05443.
6. Колесников А.А., Веселов Г.Е. Синергетическое управление нелинейными электроприводами III. Векторное управление асинхронными электроприводами. // Известия вузов. Электромеханика. – 2006. – № 2. – С. 25-36.
7. Веселов Г.Е., Колесников А.А. Аналитическое конструирование векторных законов управления асинхронными электроприводами // Известия ТРТУ. – 1999. – № 2(12). – С. 58.
8. Бахвалов Ю.А., Зарифьян А.А., Кашиников В.Н. и др. Моделирование электромеханической системы электровоза с асинхронным тяговым приводом / Под ред. Е.М. Плохова. – М.: Транспорт, 2001. – 286 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.В. Тарарыкин.

Веселов Геннадий Евгеньевич – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: deanfib@tti.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Чехова, 2, ГСП-284; тел.: 88634360450; факультет информационной безопасности; декан.

Радионов Иван Алексеевич – e-mail: radionov87@gmail.com; тел.: 88634360707; кафедра синергетики и процессов управления; аспирант.

Veselov Gennady Evgen'evich – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education "Southern Federal University"; e-mail: deanfib@tti.sfedu.ru; GSP-284, 2, Chekhov street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634360450; informational security college; dean.

Radionov Ivan Alekseevich – e-mail:radionov87@gmail.com; phone: +78634360707; the department of synergetics and control; postgraduate student.

УДК 519.688

С.Л. Беляков, М.Л. Белякова, И.Н. Розенберг, М.Н. Савельева

ПРЕЦЕДЕНТНЫЙ АНАЛИЗ МАРШРУТОВ НА ЭЛЕКТРОННЫХ КАРТАХ*

Предложена модель накопления и использования опыта маршрутизации в условиях неопределённости. Особенность модели состоит в использовании электронных географических карт для представления экспертом-логистом практически опробованных маршрутов. На основании данных о размещении траекторий перемещения производится разбиение карты на зоны. Новизна модели заключается в описании прецедентов на картах, используя в качестве меры сходства риск перемещения по маршруту. Описана структура области прецедента. Проведен анализ риска перемещения по участкам сети, прилегающим к траектории передвижения, с целью расширения области прецедента. Приведена иллюстрация примера разбиения электронной карты на прецедентные области и построение маршрутов в зависимости от зон, а также представлен образец конструирования области прецедента.

ГИС; прецедентный анализ; логистический опыт; маршрутизация.

S.L. Beliacov, M.L. Beliacova, M.N. Savelyeva

THE CASE ANALYSIS OF ROUTES ON ELECTRONIC CARDS

In this paper we propose a model of accumulation and use of experience routing under uncertainty. Feature of the model is the use of electronic maps for submission to the expert logistician practically tested routes. On the basis of data on the location of the trajectories move partition the map into zones. The novelty of the model is to describe the precedents on the maps, using as similarity measure the risk of displacement along the route. We describe the structure of a precedent. The analysis of the risk of moving parts of the network adjacent to the path of movement, in order to expand the field of precedent. An illustration of example is provided of partitioning an electronic map on the precedent and the construction of routes depending on the zones, as well as a sample design of a precedent.

GIS; precedent analysis; logistic experience; routing.

Маршрутизация представляет собой процесс определения наилучшего пути при транспортировке груза [1]. Проблема при решении такой задачи заключается в неполноте, неточности информации и многофакторности описания транспортной среды. Качество перемещения груза зависит от большого количества различных факторов, начиная от свойств перевозимого продукта и заканчивая свойствами объектов транспортной среды, влияющих на груз. Иметь полную информацию обо всех этих показателях практически невозможно, поэтому при решении задачи маршрутизации значительную роль играют знания и опыт экспертов-логистов.

* Работа поддержана грантом РФФИ, проект № 10-01-00029а.