

УДК 621.3.076

**Н. Я. Островерхов**, д-р техн. наук

### **СИСТЕМА ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ**

***Аннотация.** Представлены законы управления на основе концепции обратной задачи динамики в соединении с минимизацией локальных функционалов мгновенных значений энергий. Это обеспечивает динамическую декомпозицию взаимосвязанной системы, слабую чувствительность к изменению параметров электропривода и простоту реализации законов управления.*

***Ключевые слова:** тяговый электропривод, вентильно-индукторный двигатель, законы управления*

**M. Ostroverkhov**, ScD.

### **SYSTEM OF VECTOR CONTROL TRACTION SWITCHED RELUCTANCE ELECTRIC DRIVE**

***Abstract.** The control laws of a switched reluctance motor are developed based on a conception of reverse task of dynamics in combination with minimization of local functional of instantaneous values of energies. This allows a dynamic decomposition of an interrelated system by independent closed loops, as well as a lesser sensitivity to variation of the motor's parameters.*

***Keywords:** traction electric drive, switched reluctance motor, control laws*

**М. Я. Островерхов**, д-р техн. наук

### **СИСТЕМА ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ**

***Анотація.** Представлено закони керування на основі концепції зворотної задачі динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій. Це забезпечує динамічну декомпозицію взаємоз'язаної, слабку чутливість до зміни параметрів електропривода та простоту реалізації законів керування*

***Ключові слова:** тяговий електропривод, вентильно-індукторний двигун, закони керування*

**Введение.** В тяговом электроприводе нашли применение двигатели переменного тока, в частности асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором и синхронные двигатели с постоянными магнитами [1 – 6].

Недостатком асинхронного тягового электропривода является небольшой, около 1:2, диапазон управления в зоне ослабления магнитного поля вследствие резкого увеличения потерь, и проблема с отводом основного тепла, выделяемого в роторе двигателя.

Недостаток синхронного тягового электропривода с постоянными магнитами состоит в отсутствии управления полем возбуждения. Уменьшение магнитного потока двигателя, возможно реализовать с помощью соответствующего управления током статора, но оно связано с риском выхода из строя силового преобразователя. Синхронный двигатель имеет также повышенную стоимость и трудоемкость изготовления.

В таких условиях перспективным является тяговый электропривод переменного тока на основе вентильно-индукторного двигателя с независимым возбуждением [1 – 3]. Диапазон ослабления поля в данном электроприводе может достигать 1:8, что позволяет значительно расширить зону управления с постоянной мощностью, характерной для тяговых электроприводов. Конструкция двигателя с пассивным ротором обеспечивает высокую надежность, отсутствие скользящих контактов, выполнение распределенной обмотки статора, что уменьшает уровень вибраций и шума, а также простой отвод тепла и высокую технологичность изготовления.

© Островерхов Н.Я., 2014

Вследствие нагревания тяговых двигателей и изменения полной массы транспортного средства изменяются параметры электродвигателя, в частности электрические сопротивления обмоток, и приведенный момент инерции электропривода. Кроме того, при вычислении параметров схемы замещения двигателя по его паспортным данным возникают погрешности, обусловленные допущениями в методике вычислений. Это приводит к отклонению реальных параметров от расчетных значений, в результате чего ухудшается качество управления координатами электропривода вследствие параметрических возмущений.

По своей природе двигатели переменного тока являются взаимосвязанными объектами управления. Разработка законов управления электроприводами в таких условиях связано с компенсацией влияния координатных возмущений, в том числе и действия вихревых токов.

Решение этих проблем классическими методами теории управления в условиях неопределенностей повышает громоздкость систем управления вследствие использования дополнительных алгоритмов идентификации параметров, адаптации и компенсации.

Анализ современных методов оптимизации законов управления в условиях неопределенности показывает [7], что решение указанных проблем тягового электропривода может быть осуществлено на основе концепции обратных задач динамики в соединении с минимизацией локальных функционалов мгновенных значений энергий [8, 9]. В основу положена идея обратимости прямого метода Ляпунова по исследова-

нию устойчивости. Это позволяет находить закон управления, при котором замкнутый контур регулирования имеет заведомо заданную функцию Ляпунова, в качестве которой выступает мгновенное значение энергии. Полученный закон придает замкнутой системе свойство устойчивости в целом, что позволяет решать задачи управления взаимосвязанными, нелинейными объектами, как в линейных системах по математическим моделям локальных контуров. Характерной особенностью оптимизации являются достижение не абсолютно минимума функционала качества, как в классических системах, а некоторого минимального значения, обеспечивающего допустимую по техническим требованиям динамическую погрешность системы [8].

**Цель работы** состоит в повышении качества управления тяговым вентильно-индукторным электроприводом в условиях неопределенности математической модели путем разработки законов управления на основе концепции обратных задач динамики в соединении с минимизацией локальных функционалов мгновенных значений энергий, что обеспечивает слабую чувствительность к параметрическим и координатным возмущениям, а также простоту практической реализации.

**Материалы исследования.** Вентильно-индукторный двигатель с независимым возбуждением с точки зрения управления приближается к классическому синхронному двигателю [1]. Это позволяет разработать эффективную систему векторного управления тяговым вентильно-индукторным электроприводом с ориентацией по положению ротора двигателя. Динамическая модель вентильно-индукторного двигателя в системе координат (d-q) описывается известной взаимосвязанной системой уравнений (1)

$$\begin{cases} L_s \frac{di_d}{dt} + R_s i_d = U_d + F_1; \\ L_s \frac{di_q}{dt} + R_s i_q = U_q + F_2; \\ L_s \frac{di_f}{dt} + R_f i_f = U_f + F_3; \\ J \frac{d\omega_r}{dt} = M - M_c; \\ \Psi_d = L_s i_d + L_m i_f; \\ \Psi_q = L_s i_q; \\ \Psi_f = L_f i_f + L_m i_d; \\ M = \sqrt{3} Z_p [\Psi_d i_q - \Psi_q i_d], \end{cases} \quad (1)$$

где  $i_d, i_q$  и  $U_d, U_q$  – токи и напряжения статора по осям d и q;  $i_f$  и  $U_f$  – ток и напряжение возбуждения;  $\omega = Z_p \omega_r$ ;  $\omega_r, \omega$  – угловая и электрическая скорость ротора;  $Z_p$  – число пар полюсов;  $M, M_c$  – электромагнитный момент двигателя и момент нагрузки;  $\Psi_d, \Psi_q, \Psi_f$  – потокосцепление по осям d, q и обмотки возбуждения;  $L_s, L_f, L_m$  – индуктивность фазы, обмотки возбуждения и взаимная индуктивность;  $J$  – суммарный момент инерции;  $R_s, R_f$  – ак-

тивное электрическое сопротивление обмотки статора и возбуждения.

Координатные возмущения  $F_1 = L_m \frac{di_f}{dt} - \omega \Psi_q$ ,  $F_2 = \omega \Psi_d$ ,  $F_3 = L_m \frac{di_d}{dt}$  обуславливают взаимное влияние

координат электропривода. В классических системах для компенсации их отрицательного действия в контуры управления вводятся дополнительные связи, точность которых зависит от точности параметров двигателя, а разработка законов управления осуществляется после статической декомпозиции объекта (1).

В данной работе эта задача решается путем динамической декомпозиции системы [10], которую обеспечивает предложенный метод оптимизации. Координатные возмущения  $F_1, F_2, F_3$  трактуются как неопределенные, но ограниченные по величине  $F_1 \leq F_{1max}$ ,  $F_2 \leq F_{2max}$ ,  $F_3 \leq F_{3max}$ . Уровня управляющих напряжений  $U_d, U_q, U_f$  достаточно для их парирования.

Система векторного управления электроприводом состоит из трех независимых контуров регулирования: тока возбуждения  $i_f$ ; тока статора  $i_q$  по оси q, который определяет тяговый момент двигателя; тока статора  $i_d$  по оси d, магнитный поток от которого может как подмагничивать так и размагничивать основной поток от обмотки возбуждения. При необходимости регулировать не только тяговый момент двигателя (основное назначение электропривода), а и скорость, то система может быть дополнена контуром регулирования угловой скорости двигателя  $\omega_r$ .

Согласно первому уравнению системы (1) объект локального контура управления током  $i_d$  описывается линейным дифференциальным уравнением первого порядка, на который действует управляющее напряжение  $U_d$  и координатное возмущение  $F_1$ . Желаемое уравнение замкнутого контура тока, с помощью которого устанавливаются заданные показатели качества управления, также задается уравнением первого порядка [9]

$$\dot{z} + \alpha_{0id} z = \alpha_{0id} i_d^*, \quad (2)$$

где  $i_d^*$  – заданный ток. Уравнение обеспечивает астатизм первого порядка по управляющему воздействию и продолжительность монотонного переходного процесса тока равную  $t_n \approx 3/\alpha_{0id}$ , которая устанавливается необходимой величиной коэффициента уравнения  $\alpha_{0id}$ .

Степень приближения реального процесса управления током к желаемому оценивается функционалом, характеризующим нормированную по индуктивности мгновенную энергию магнитного поля от первой производной тока

$$G(u) = \frac{1}{2} [\dot{z}(t) - i_d(t)]^2. \quad (3)$$

Минимизация функционала осуществляется по градиентному закону первого порядка

$$\frac{du(t)}{dt} = -\lambda_{i_d} \frac{dG(u)}{du}, \quad (4)$$

где  $\lambda_{i_d}$  – константа.

После подстановки (1) и (3) в (4) и интегрирования обеих частей уравнения находится закон управления током

$$U_d(t) = k_{i_d}(z - i_d);$$

$$z = \alpha_{0i_d} \int_0^t (i_d^* - i_d) dt. \quad (5)$$

где  $k_{i_d} = \lambda_{i_d} / L_s$  – коэффициент усиления регулятора.

В отличие от классических законов управления, разработанный закон (5) не содержит параметров объекта управления (1), а вмещает только параметр  $\alpha_{0i_d}$  желательного уравнения качества (2). Дифференциальное уравнение замкнутого контура управления током  $i_d$  с законом управления (5)

$$\ddot{i}_d + (R_s/L_s + k_{i_d}/L_s)\dot{i}_d + (k_{i_d}\alpha_{0i_d}/L_s)i_d = (k_{i_d}\alpha_{0i_d}/L_s)i_d^* \quad (6)$$

показывает, что процесс управления является асимптотически устойчивым. Согласно критерию Гурвица коэффициенты  $(k_{i_d}\alpha_{0i_d}/L_s) > 0$ ,  $(R_s/L_s + k_{i_d}/L_s) > 0$ . Устойчивость контура управления сохраняется при неограниченном повышении коэффициента усиления регулятора  $k_{i_d} \rightarrow \infty$  и обеспечивает полное совпадение реального (6) и желаемого (2) процессов управления, которое очевидно при делении всех членов уравнения (6) на коэффициент  $k_{i_d}/L_s$ . Эта особенность обеспечивает динамическую декомпозицию системы и слабую чувствительность к параметрическим возмущениям. Во время работы взаимосвязанная система распадается на независимые локальные контуры управления, процессы в которых не зависят от действия параметрических и координатных возмущений, а протекают по траекториям, назначенным уравнениями желаемого качества вида (2). Конечно, при допус­тимом с точки зрения технической реализации коэффициенте усиления регулятора  $k_{i_d}$  существует динамическая погрешность, допустимая величина которой устанавливается техническими требованиями.

На основании второго уравнения системы (1) по аналогичной методике получается закон управления током статора  $i_q$ , который пропорциональный тяговому моменту двигателя

$$U_q(t) = k_{i_q}(z - i_q);$$

$$z = \alpha_{0i_q} \int_0^t (i_q^* - i_q) dt. \quad (7)$$

Закон управления током возбуждения получается на основе третьего уравнения системы (1)

$$U_f(t) = k_{i_f}(z - i_f);$$

$$z = \alpha_{0i_f} \int_0^t (i_f^* - i_f) dt. \quad (8)$$

Законы управления (7) и (8) также не содержат параметров объекта (1), а вмещают только параметры желаемых уравнений качества вида (2).

Закон управления скоростью разрабатывается на основе четвертого уравнения системы (1) путем минимизации энергии ускорения массы и имеет следующий вид

$$i_q^*(t) = k_{\omega}(z - \omega_r);$$

$$z = \alpha_{0\omega} \int_0^t (\omega_r^* - \omega_r) dt. \quad (9)$$

Контур регулирования скоростью является внешним относительно внутреннего контура тока  $i_q$ , поэтому для уменьшения влияния динамики последнего коэффициенты регуляторов выбираются из условия  $\alpha_{0i_q} > (3 \div 5)\alpha_{0\omega}$ . Закон управления (9) обеспечивает астатизм первого порядка. Если по технологическим требованиям необходимо иметь астатизм второго порядка, то уравнение желаемого качества вида (2) берется второго порядка

$$\ddot{z} + \alpha_{1\omega}\dot{z} + \alpha_{0\omega}z = \alpha_{1\omega}\dot{\omega}^* + \alpha_{0\omega}\omega^* \quad (10)$$

В результате закон управления скоростью принимает вид

$$i_q^*(t) = k_{\omega}[z - \omega_r];$$

$$z = \int f_0 dt; \quad (11)$$

$$f_0 = \alpha_{0\omega} \int (\omega_r^* - \omega_r) dt + \alpha_{1\omega}(\omega_r^* - \omega_r).$$

С помощью параметров  $\alpha_{0\omega}$ ,  $\alpha_{1\omega}$  устанавливается желаемый вид, перерегулирование и время переходного процесса скорости.

Из передаточной функции разомкнутого контура скорости для закона управления (11)

$$W_{\text{пр}}(p) = \frac{(k_{\omega}\alpha_{1\omega}/J)p + (k_{\omega}\alpha_{0\omega}/J)}{p^2[p + (k_{\omega}/J)]} \quad (12)$$

видно, что контур владеет заданным астатизмом второго порядка и добротностью по ускорению равную заданной

$$D_e = D_e^e = \alpha_{0\omega}. \quad (13)$$

Выполнение условия (13) обеспечивает допустимую погрешность управления скоростью при умеренном коэффициенте усиления регулятора скорости  $k_{\omega}$ .

**Выводы.** Полученные на основе концепции обратной задачи динамики в соединении с минимизацией локальных функционалов мгновенных значений энергий законы управления тяговым вентильно-индукторным электроприводом обеспечивают динамическую декомпозицию взаимосвязанной системы на локальные подсистемы и слабую чувствительность к изменению параметров электропривода. Особенностью законов управления является отсутствие операций дифференцирования, что обуславливает простоту практической реализации.

Список использованной литературы

1. Козаченко В. Ф. Вентильно-индукторный электропривод с независимым возбуждением для тягового применения [Текст] / В. Ф. Козаченко, М. М.

Лашкевич // *Электротехнические и компьютерные системы*. – 2011. – № 03(79). – С. 138 – 139.

2. Burkhart B., and Brauer H.J., (2012), Design of a Switched Reluctance Traction Drive for Electric Vehicles, *Vehicle Power and Propulsion Conference, IEEE, Seoul, 9-12 Oct. 2012*, pp. 204 – 209.

3. Chen H., (2006), Switched Reluctance Motors Drive for the Electrical Traction in Shearer, *Power Electronics and Motion Control Conference. CES/IEEE 5th International, Shanghai, 14-16 Aug. 2006*, Vol. 2, pp.1 – 4.

4. Ehsani M., and Yimin Gao, (2003), Characterization of Electric Motor Drives for Traction Applications, *Industrial Electronics Society, 29th Annual Conference of the IEEE, V. 1*, pp. 891 – 896.

5. Simanek J., and Novak J., (2007), Control Algorithms for Permanent Magnet Synchronous Traction Motor, *Proceedings EUROCON2007, Warsaw, Sept. 2007*, pp. 1839 – 1844.

6. Conilh C., and Pietrzak-David M., (2005), Sensorless Traction System with Low Voltage High Current Induction Machine for Indoor Vehicle, *Proc. of the IEEE/PEDS'2005 Confer.*, pp. 50 – 55.

7. Потапенко Е. М. Высокоточное управление неопределенными объектами. Сравнение методов управления [Текст] / Е. М. Потапенко, А. Е. Казурова // Сб. научн. труд. Днепродзержинского гос. техн. ун-та. – Днепродзержинск : ДГТУ. – 2007. – С. 353 – 356.

8. Крутько П. Д. Робастно устойчивые структуры управляемых систем высокой динамической точности. Алгоритмы и динамика управления движением модельных объектов [Текст] / П. Д. Крутько // Изв. РАН. ТиСУ. – 2005. – № 2. – С. 120 – 140.

9. Островерхов Н. Я. Управление координатами электроприводов на основании концепции обратных задач динамики при минимизации локальных функционалов мгновенных значений энергий [Текст] / Н. Я. Островерхов, Н. П. Бурик // *Электротехника и электроэнергетика*. – Запорожье : ЗНТУ. – 2011. – № 1. – С. 41 – 49.

10. Черноусько Ф. Л. Декомпозиция и субоптимальное управления в динамических системах [Текст] / Ф. Л. Черноусько // *ПММ*. – 1990. – Т. 54. – Вып. 6. – С. 883 – 893.

Получено 03.07.2014

## References

1. Kozachenko V., and Lashkevich M. Ventilno-induktornyj elektroprivod s nezavisimym vobuzhdeniem dlya tyagovogo primeneniya [Electric Drive with Switched Reluctance Motor with Independent Excitation for Traction Application], (2011), *Elektrotehnicheskie and Kompyuternye Sistemy*, Vol. 03(79), pp. 138 – 139 (In Russian).

2. Burkhart B., and Brauer H.J., (2012), Design of a Switched Reluctance Traction Drive for Electric Vehicles, *Vehicle Power and Propulsion Conference. IEEE, Seoul, 9-12 Oct. 2012*, pp. 204 – 209.

3. Chen H., (2006), Switched Reluctance Motors Drive for the Electrical Traction in Shearer, *Power Electronics and Motion Control Conference. CES/IEEE 5th International, Shanghai, 14-16 Aug. 2006*, Vol. 2, pp. 1 – 4.

4. Ehsani M., and Yimin Gao, (2003), Characterization of Electric Motor Drives for Traction Applications, *Industrial Electronics Society. 29th Annual Conference of the IEEE*, Vol. 1, pp. 891 – 896.

5. Simanek J., and Novak J., (2007), Control Algorithms for Permanent Magnet Synchronous Traction Motor, *Proceedings EUROCON 2007, Warsaw, Sept. 2007*, pp. 1839 – 1844.

6. Conilh C., and Pietrzak-David M., (2005), Sensorless Traction System with Low Voltage High Current Induction Machine for Indoor Vehicle, *Proc. of the IEEE/PEDS'2005 Confer.*, pp. 50 – 55.

7. Potapenko E.M., and Kazurova A.E. Vysokotochnoe upravlenie neopredelennymi obektami. Sravnenie metodov upravleniya [Precision Control Uncertain Objects. Comparison of Methods of Control], (2007), *Sb. Nauchn. Trud. Dneprodzherzhinskogo Gos. Techn. Universta*, pp. 353 – 356 (In Russian).

8. Krut'ko P.D. Robastno ustojchivye struktury upravlyаемых систем высокой динамической точности. Algoritmy i dinamika upravleniya dvizheniem modelnykh obektov [Robustly Stable Structures of Control Systems of High Dynamic Precision. Algorithms and Dynamics of Control of Model Objects], (2005), *Izvestija RAN. TISU*, Vol. 2, pp. 120 – 140 (In Russian).

9. Ostroverkhov N., and Buryk N. Upravlenie koordinatami elektroprivodov na osnovanii koncepcii obratnykh zadach dinamiki pri minimizacii lokalnykh funkcionalov mgnovennykh znachenij energij [Control of Coordinates Electric Drives Based on the Concept of Inverse Dynamics Problems for Minimization Local Functionals Momentary Values of Energy], (2011), *Elektrotehnika i Elektroenergetika*, Vol. 1, pp. 41 – 49 (In Russian).

10. Chernousko F. Dekompoziciya i suboptimalnoe upravleniya v dinamicheskix sistemax [Decomposition and Suboptimum Control in Dynamic Systems], (1990), *PMM*, Vol. 6, pp. 883 – 893 (In Russian).



Островерхов  
Николай Яковлевич,  
д-р техн. наук, проф. каф.  
автоматизации электромеханических систем и электропривода  
нац. технического ун-та  
Украины «Киевский политехнический ин-т».  
03056, г. Киев, просп. Победы, 37,  
Тел. (044) 406-83-56.  
E-mail: ostroverkhov@list.ru