

ОПТИМАЛЬНОЕ РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЯГОВЫМ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ

А.А.Шийка, аспирант, Е.М. Потапенко, д.т.н., проф., ЗНТУ

Аннотация. Разработан метод минимизации потерь мощности тягового асинхронного электропривода (ТАЭП) автотранспортного средства (АТС) с гибридной силовой установкой. Предложенный метод позволяет существенно снизить энергопотребление ТАЭП по сравнению с известными методами оптимального управления. Обеспечивается робастность к неопределенности массово-инерционных характеристик и электрических параметров электропривода во всех режимах работы. Приведены результаты моделирования работы ТАЭП с управлением по предлагаемому методу, подтверждающие его ожидаемые характеристики.

Ключевые слова: гибридный автомобиль, асинхронный двигатель, векторное управление, оптимизация, робастное управление, минимизация потерь мощности.

ОПТИМАЛЬНЕ РОБАСТНЕ КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ АСИНХРОНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ГИБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ

А.А.Шийка, аспірант, Є.М. Потапенко, д.т.н., проф., ЗНТУ

Анотація. Розроблено метод мінімізації втрат потужності тягового асинхронного електропривода (ТАЕП) автотранспортного засобу з гібридною силовою установкою. Запропонований метод дозволяє суттєво знизити енергоспоживання ТАЕП у порівнянні з відомими методами оптимального керування. Забезпечується робастність по відношенню до невизначеності масово-інерційних характеристик та електричних параметрів електропривода у всіх режимах роботи. Наведено результати моделювання роботи ТАЕП з керуванням по запропонованому методу, що підтверджують його очікувані характеристики.

Ключові слова: гібридний автомобіль, асинхронний двигун, векторне керування, оптимізація, робастне керування, мінімізація втрат потужності.

ROBUST LOSS-MINIMIMISING CONTROL OF TRACTION INDUCTION MOTOR DRIVE OF HYBRID VEHICLE

A. Shiyka, postgraduate, E.Potapenko, professor, dr. eng. sc.,
Zaporizhzhya National Technical University

Abstract. This paper presents a loss-minimizing control method of the traction induction motor drive of hybrid vehicle. Proposed algorithm provides significant decrease of power losses of traction induction motor drive compare to conventional vector control method. Robustness to indeterminacy of electrical parameters, torque, and inertia of the drive are ensured. The validity of proposed algorithm is demonstrated by simulation.

Key words: hybrid vehicle, induction motor, optimal vector control, robust control, power loss minimization.

Актуальность работы

В настоящее время все большую остроту приобретает глобальная проблема ограниченности ресурсов. В связи с постоянным повышением цен на топливо и неудовлетворительными экологическими показателями автотранспортные средства (АТС) с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) в перспективе уступят место гибридным автомобилям

(ГА) и электромобилям. Основной причиной ограниченного распространения электромобилей является отсутствие надежного и дешевого источника энергии. Компромиссным решением является разработка АТС с гибридной силовой установкой, включающий в себя ДВС, тяговый электродвигатель и аккумуляторную батарею (АКБ). Упрощенная структурная схема силовой установки ГА приведена на рис.1 [1,2].

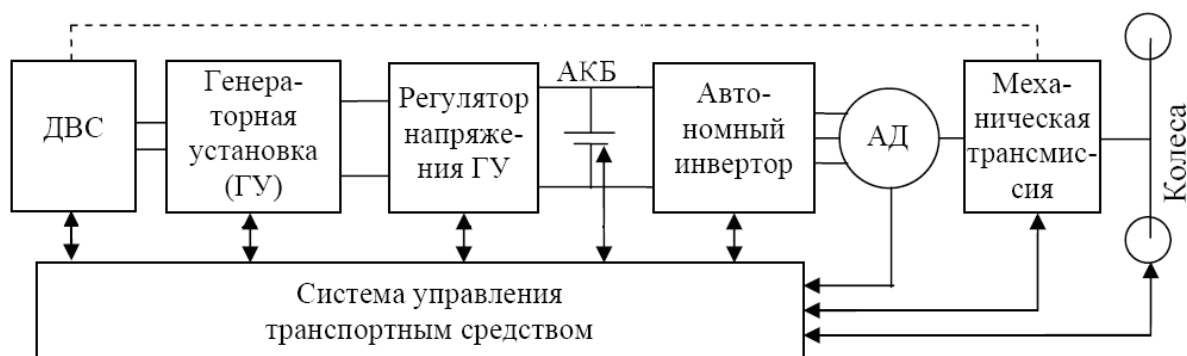


Рис. 1. Упрощенная структурная схема силовой установки ГА

Для тягового электропривода ГА преимущественно применяются синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ), обладающие высокими удельными энергетическими и массогабаритными показателями, высокой надежностью, большим ресурсом работы. Однако стоимость СДПМ существенно выше (на 20–40%), чем асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором. Кроме того, АД по сравнению с СДПМ более экономичен при высоких скоростях вращения ротора. Это объясняется большими возможностями ослабления магнитного потока в АД, что ведет к уменьшению потерь в стали статора.

Наиболее перспективным способом управления АД в настоящее время является векторное управление (ВУ), получившее широкое распространение в промышленности [3]. Управление тяговым АД АТС имеет свою специфику – он постоянно функционирует в «старт-стоп» режимах, в режимах ускорения и замедления, с широкими диапазонами изменения скорости и момента, температурных изменений сопротивлений обмоток АД, при питании от источников энергии с ограниченной мощностью.

Управление АД должно обеспечивать необходимые динамические характеристики и минимум потерь мощности, а также обеспе-

чивать робастность к неопределенности массово-инерционных характеристик и электрических параметров электропривода во всех режимах работы.

Предложено несколько методов оптимального управления АД, наиболее распространенным из которых является метод максимизации отношения «момент/ток» (М/Т) [4]. Однако этот критерий имеет косвенное отношение к энергопотреблению. Необходима разработка такого критерия оптимальности, который позволяет непосредственно минимизировать потребляемую мощность.

Для синтеза оптимальных алгоритмов управления необходимо провести анализ потерь в АД. В большинстве публикаций учитываются потери на нагрев обмоток статора и ротора АД, а потери в стали, связанные с образованием вихревых токов и потерь на гистерезис, часто не рассматриваются. Важность учета потерь в стали определяется существенным вкладом этих потерь в суммарные потери АД при больших скоростях (более 20%) [5].

Целью данной работы является улучшение эксплуатационных свойств АТС с гибридной силовой установкой путем синтеза оптимальных методов управления тяговым АД по минимуму потерь мощности.

Материал и результаты исследований

1. Постановка задачи. Уравнения электромагнитных процессов АД, записанные относительно токов статора и потокосцепления ротора в синхронном базисе (d, q) , ориентированном по вектору потокосцепления ротора, можно привести к виду [3, 6]

$$u = \sigma L_s \frac{di}{dt} + (R_s + R_r L_{mr}^2) i + \omega_0 \sigma L_s J i - L_{mr} (E T_r^{-1} - n \omega J) [\psi_d \ 0]^T, \quad (1)$$

$$T_r p \psi_d = -\psi_d + L_m i_d, \quad (2)$$

$$m = n L_{mr} \psi_d i_q, \quad (3)$$

$$I \dot{\omega} = m + m_t + m_f, \quad (4)$$

$$\omega_0 = \omega n + \omega_{sl} = \omega n + L_m i_q / (T_r \psi_r), \quad (5)$$

где ψ , i , u – векторы потокосцепления ротора, тока и напряжения статора; m – электромагнитный момент; m_t , m_f , I – неизвестные моменты нагрузки, трения, инерции; n – количество пар полюсов; R_s – активное сопротивление фаз статора АД с эквивалентным сопротивлением преобразователя частоты ПЧ); R_r – активное сопротивление ротора; L_s , L_r , L_m – индуктивности фаз статора, ротора и взаимная индуктивность; $\sigma = 1 - L_m^2 / L_s L_r$ – коэффициент рассеивания; $T_r = L_r / R_r$ – постоянная времени роторной цепи; ω_0 – скорость вращения вектора потокосцепления ротора (синхронная скорость); ω , ω_{sl} – скорости ротора и скольжения; p – оператор дифференцирования; $E = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$; $J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$.

При синтезе алгоритмов оптимального управления ТАЭП необходимо учитывать ограничения тока и напряжения питания АД, накладываемые на систему предельными возможностями автономного инвертора и условиями безопасной работы АД [3], а именно,

$$|I_s|^2 = i_{dp}^2 + i_{qp}^2 \leq I_{\max}^2, \quad I_{\max} = 1,5 I_n \quad (6)$$

$$|U_s|^2 = u_{dp}^2 + u_{qp}^2 \leq U_{\max}^2, \quad U_{\max} = U_{dc} / \sqrt{3} \quad (7)$$

где U_{dc} – в цепи постоянного тока инвертора, I_n – номинальное значение тока статора.

2. Предлагаемые методы синтеза. По аналогии с работами [7, 8] вводится замена переменных

$$i_{dp} = k \sqrt{\frac{m_p}{n L_\Sigma}}, \quad i_{qp} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{m_p}{n L_\Sigma}} \text{sign}(m_p), \quad (8)$$

где $L_\Sigma = L_m^2 L_r^{-1}$; $k > 0$ – искомый оптимизирующий коэффициент связи токов статора, с помощью которого можно задать любое соотношение между токами i_{dp} , i_{qp} . Справедливость данной замены подтверждается подстановкой выражений (8) в (3), что дает тождество. Такая замена позволяет при заданном электромагнитном моменте проводить минимизацию потерь мощности, варьируя не двумя переменными i_{dp} , i_{qp} , а одной переменной k . Индекс p указывает на программное значение соответствующей переменной. В работе [8] для уравнений (1)–(5) получено следующее выражение потребляемой мощности АД:

$$P = \frac{1}{2} \sigma L_s \frac{d}{dt} (i_{dp}^2 + i_{qp}^2) + R_s (i_{dp}^2 + i_{qp}^2) + R_r L_{mr}^2 i_{qp}^2 + \omega m_p + L_{mr} i_{dp} \dot{\psi}_d + \frac{\omega_0^2 L_m^2}{R_m} \left(\left(\frac{L_{lr}}{L_r} \right)^2 i_{qp}^2 + i_{dp}^2 \right), \quad (9)$$

где первое слагаемое представляет собой потери рассеяния, второе и третье – потери мощности на нагрев соответственно в обмотках статора и ротора (потери в меди), четвертое слагаемое является полезной механической мощностью, пятое слагаемое – мощность магнитных полей машины, шестое – потери в стали АД, R_m – сопротивление цепи намагничивания, L_{lr} – индуктивность рассеивания ротора.

Анализ выражения (9) свидетельствует о том, что в зоне низких скоростей доминирующими будут потери в меди АД. С ростом скорости потери в стали будут увеличиваться пропорционально ω_0^2 , следовательно, при больших скоростях, эти потери будут опре-

деляющими. Подстановка токов статора (8), в выражение (9) в установившемся режиме дает

$$P = \frac{|m_p|}{nL_\Sigma} \left[R_s(k^2 + k^{-2}) + R_r L_{mr}^2 k^{-2} + \omega n L_\Sigma \operatorname{sign}(m_p) + \frac{\omega_0^2 L_m^2}{R_m} \left(\left(\frac{L_{lr}}{L_r} \right)^2 k^{-2} + k^2 \right) \right]. \quad (10)$$

Значение оптимального коэффициента токов статора k , при котором потребляемая мощность будет минимальной в каждый момент времени для каждого значения скорости, определяется выражением [8]

$$k = \sqrt[4]{\frac{R_s + R_r L_{mr}^2 + \frac{\omega_0^2 L_m^2 L_{lr}^2}{L_r^2 R_m}}{R_s + \frac{\omega_0^2 L_m^2}{R_m}}} \quad (11)$$

Подстановка k из (11) в (8) дает выражение программных статорных токов, минимизирующих потребляемую мощность, а также мощность потерь.

На рис. 2 приведены графики моделирования разгона ТАЭП с управлением по предлагаемому методу до скорости 314 рад/с (кривые показаны сплошной линией). Расчет проводился для трехфазного АД 4А100L2У3 с параметрами, приведенными в таблице 1. Момент нагрузки принят равным номинальному (18 Нм). Для сравнения на рис. 2 построены аналогичные графики, полученные для метода максимизации отношения «момент-ток» (кривые показаны штрихпунктирной линией). Отметим, что для предлагаемого метода при низких скоростях коэффициент связи токов статора $k \geq 1$, $i_d \geq i_q$, что обеспечивает низкий уровень потерь в меди. При росте скорости значение k уменьшается, вследствие чего становится $i_d < i_q$, следовательно, обеспечивается автоматическое уменьшение уровня магнитного потока, и уменьшение потерь в стали. Как следует из рис. 2г, применение предложенного метода оптимального управления позволяет уменьшить потери мощности ТАЭП на 20% по сравнению с методом максимизации отношения «момент-ток».

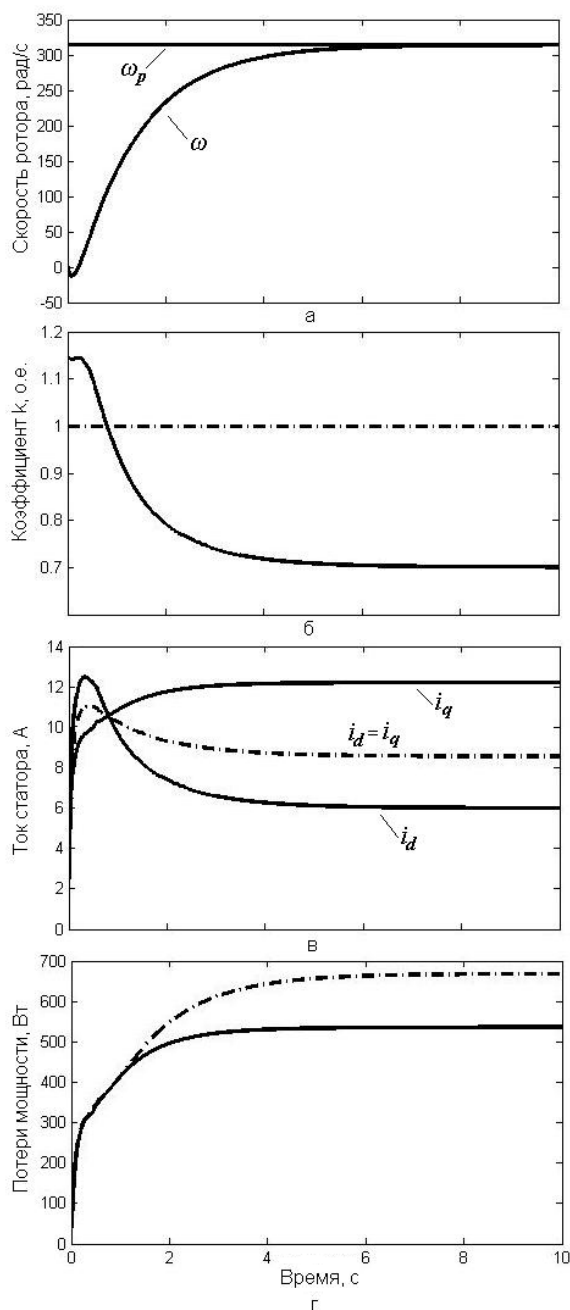


Рис. 2. Результаты моделирования

3. Функциональная схема системы АЭП представлена на рис. 3. Робастность системы обеспечивается за счет использования комбинированного управления, реализованного блоками «Регулятор момента» (РМ) и «Регулятор токов» (РТ), принципы действия и алгоритм работы которых описаны в [6]. Для управления измеряются скорость ротора ω и две из трех фазы тока, по которым вычисляются токи i_d , i_q . РМ формирует желаемый (программный) электромагнитный момент m_p , осуществляющий компенсацию влияния неопределенностей и формирование заданного вида движения ротора.

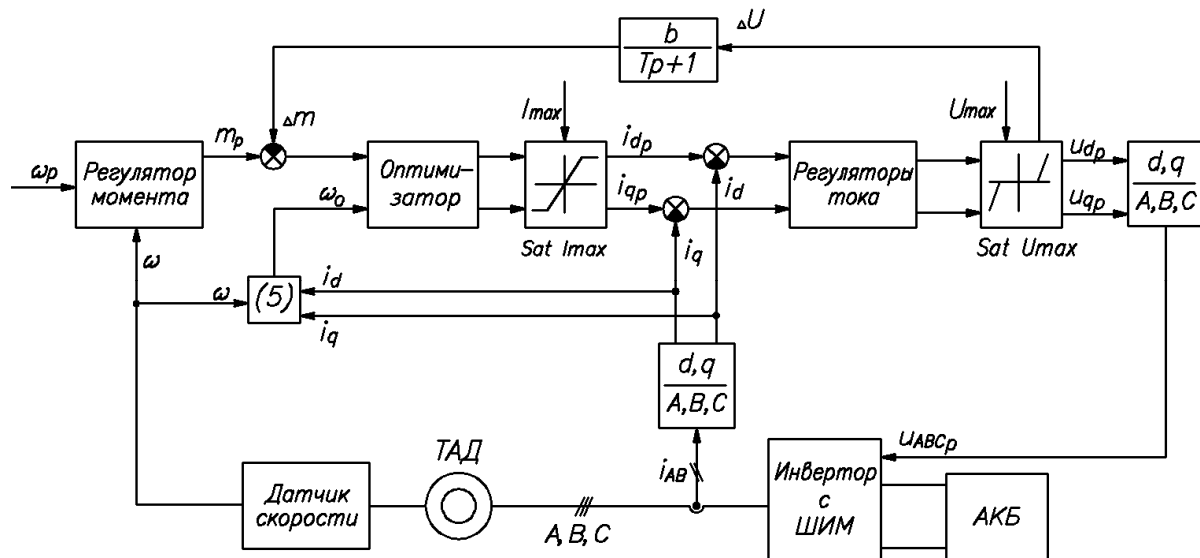


Рис. 3. Функциональная схема системы управления АЭП

По выражению (8) блок «Оптимизатор» формирует программные токи i_{dp} , i_{qp} , минимизирующие потери мощности и обеспечивающие требуемые динамические характеристики. При невыполнении условия ограничения (6) программные токи ограничиваются блоком ограничения тока (ОТ) [2]. Вычисленные токи i_d , i_q вычитаются из программных токов i_{dp} , i_{qp} , полученные разности подаются в робастные комбинированные РТ, которые компенсируют влияние перекрестных связей между контурами токов, неточностей знания сопротивлений и индуктивностей и формируют программные напряжения u_{dp} , u_{qp} .

При невыполнении ограничения (7) блоком ограничения напряжения (ОН) формируется сигнал для уменьшения программного момента, за счет чего напряжения u_{dp} , u_{qp} ограничиваются. Полученные напряжения преобразуются в трехфазную форму, которая используется для управления автономным инвертором, подающим напряжение на АД.

Таблица 1 Основные параметры двигателя 4A100L2Y3

$P_n = 5,5 \text{ кВт}$	$R_s = 1,05 \text{ Ом}$	$L_m = 0,25 \text{ Гн}$
$n_n = 3000 \text{ об/мин}$	$R_r = 0,77 \text{ Ом}$	$L_s = 0,254 \text{ Гн}$
$n = 1$	$R_m = 1000 \text{ Ом}$	$L_r = 0,254 \text{ Гн}$

Выводы

1. В работе синтезированы алгоритмы оптимального управления ТАЭП гибридной силовой установки АТС по критерию минимума потерь мощности.
2. Введение коэффициента связи токов статора k и предложенной замены (8) позволяют решать задачи оптимизации в реальном времени, что приводит к экономии электроэнергии.
3. Предложенный метод формирования статорных токов по критерию минимума потерь мощности (блок «Оптимизатор») обеспечивает уменьшение потерь мощности ТАЭП на 20% по сравнению с методом максимизации отношения «момент-ток».
4. Использование робастных комбинированных регуляторов момента и токов [6] обеспечивает робастность системы по отношению к изменению параметров двигателя, объекта управления, внешних воздействий на объект управления, перекрестным связям контуров токов.
5. Работоспособность предложенного метода управления проверена моделированием работы ТАЭП.

Литература

1. Синергетичний автомобіль. Теорія і практика / [Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А., Двадненко В.Я.]. – Харків: ХНАДУ, 2011. – 236 с.
2. Овсянников Е.М., Нгуен Куанг Тхиеу, Нгуен Хак Туан. Управление тяговым асинхронным электроприводом гибридных автомобилей по минимуму потерь и максимуму перегрузочной способности // Сб. научн. тр. 65-ой межд.научн.-техн. конф. Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ) «Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров». –М.: МАМИ, 2009.
3. Novotny, D.W., and Lipo, T.A, Vector control and dynamics of AC drives, (Clarendon Press, Oxford, UK, 1996)
4. Пересада С.М, Дымко С.С. Прямое векторное управление моментом асинхронных двигателей с максимизацией соотношения момент-ток// Электротехнические и компьютерные системы. Н.-т. журнал. Киев «Техника» – 2011.– № 03(79)– С. 28-31.
5. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВПО Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».– Иваново, 2008. 298 с. ISBN.
6. Потапенко Е.М. Робастные алгоритмы векторного управления асинхронным приводом // Е.М. Потапенко, Е.Е. Потапенко. – Запорожье: ЗНТУ. – 2009. – С. 352.
7. Потапенко Е.М., Шийка А.А. Оптимальное робастное широкодиапазонное управление скоростью асинхронного двигателя // Радіоелектроніка, інформатика, управління – Запоріжжя: ЗНТУ, 2012.– Вип. 2'2012 – С. 156-162.
8. Потапенко Е.М., Шийка А.А. Робастное управление асинхронным электроприводом с минимизацией потребляемой мощности// Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук. – КрНУ, 2013. – Вип. 2/2013 (22). – Частина 2. – С. 315-320.

Рецензент: А.В. Бажинов, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 16 сентября 2013 г.