

## УПРАВЛЕНИЕ ВЕКТОРОМ ТОКА ТЯГОВОГО ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ

С.А. Сериков, доцент, к.т.н., ХНАДУ

*Аннотация.* Исследованы характеристики тягового вентильного двигателя в допустимых тягово-скоростных режимах, характерных для силовой установки гибридного автомобиля, при оптимальном управлении вектором тока статора. В качестве критерия оптимальности выбран максимум электромагнитного момента, приходящегося на единицу тока потребления.

*Ключевые слова:* вентильный двигатель, оптимальное управление, силовая установка гибридного автомобиля.

## УПРАВЛІННЯ ВЕКТОРОМ СТРУМУ ТЯГОВОГО ВЕНТИЛЬНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ

С.А. Серіков, доцент, к.т.н., ХНАДУ

*Анотація.* Досліджені характеристики тягового вентильного двигуна в допустимих тягово-швидкісних режимах, характерних для силовій установки гібридного автомобіля, при оптимальному управлінні вектором струму статора. Як критерій оптимальності вибраний максимум електромагнітного моменту, що припадає на одиницю струму споживання.

*Ключові слова:* вентильний двигун, оптимальне управління, силова установка гібридного автомобіля.

## CURRENT VECTOR CONTROL OF PERMANENT-MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR OF HYBRID VEHICLE ENGINE

S. Serikov, associate professor, cand. eng. sc., KhNAHU

*Abstract.* Characteristics of traction permanent-magnet synchronous motor under current vector optimum control in the possible traction-speed mode area which are relevant for hybrid vehicle engine have been investigated. As a criterion of optimality a maximum of electromagnetic moment per unit of current have been taken

*Key words:* synchronous motor, optimal control, power unit hybrid vehicle.

### Введение

Наиболее перспективным направлением решения задачи повышения экологической чистоты и экономичности транспортных средств (ТС) является применение гибридных силовых установок (ГСУ), которые включают, помимо основного двигателя

внутреннего сгорания, вспомогательный двигатель и контур рекуперации энергии.

При этом в качестве вспомогательного двигателя в ГСУ часто применяют вентильный двигатель (ВД). ВД представляет собой систему регулируемого электропривода, состоящую из электродвигателя переменного тока, конструктивно подобного синхронной

машине, вентильного преобразователя (ВП) и устройства управления, обеспечивающего коммутацию цепей обмоток статора в зависимости от углового положения ротора. В качестве тягового электропривода применяются ВД на основе синхронного двигателя с возбуждением от расположенных на роторе постоянных магнитов. Использование ВД имеет ряд конструктивных и технико-эксплуатационных преимуществ: бесконтактность и отсутствие узлов, требующих обслуживания; большая перегрузочная способность по моменту; наивысшие энергетические показатели из-за отсутствия потерь на возбуждение; простота системы охлаждения из-за отсутствия на роторе нагреваемых током нагрузки обмоток; большой срок службы, надежность; лучшие массогабаритные и стоимостные показатели по сравнению с ДППТ.

При проектировании новых гибридных ТС возникает сложная проблема научного обоснования базовых параметров и характеристик ГСУ. Для решения данной проблемы используются методики, основанные на проведении вычислительных экспериментов с соответствующими математическими моделями. Однако проведение сравнительного анализа различных конструктивных решений не представляется возможным без оптимизации алгоритмов управления как ГСУ в целом, так и составляющих ее отдельных агрегатов. Данная работа посвящена исследованию закона управления ВД в составе ГСУ, обеспечивающего минимальный ток потребления при заданной нагрузке.

### Анализ публикаций

Вопросы, связанные с идентификацией математических моделей ГСУ, её управляющих и возмущающих воздействий, а также синтезом системы управления ГСУ рассмотрены в [1–4]. Однако в данных работах в качестве объекта управления рассматривается ГСУ в целом. Системы управления ДВС, вспомогательного двигателя и элементов контура рекуперации считаются неотъемлемыми частями соответствующих агрегатов, обеспечивающие оптимальное управление на всех режимах работы.

При использовании ВД в качестве вспомогательного двигателя ГСУ возникает задача управления вектором тока статора. Синтезу математической модели ВД и закона управления током статора посвящены работы [5–7]. Однако задача сравнительного анализа раз-

личных конструктивных решений ГСУ, включающей ВД, на основании вычислительного эксперимента порождает ряд особенностей при синтезе управляющих воздействий. Вопросы технической реализации законов управления оказываются несущественными. В то же время оптимальность управления вектором тока на всех задаваемых тягово-скоростных режимах при заданных ограничениях и критериях качества приобретает особое значение. При этом уровень сложности законов управления должен обеспечивать возможность моделирования ГСУ в стандартном ездовом цикле движения.

### Цель и постановка задачи

Рассмотрим систему координат  $(d, q)$ , связанную с ротором ВД и неподвижную относительно его. Будем считать, что ось  $d$  совмещена с осью магнитного потока ротора. В данной системе координат уравнения для электромагнитных процессов ВД в скалярной форме можно записать в виде

$$\begin{cases} u_d = R_1 \cdot i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - p_p \cdot \omega \cdot \psi_q; \\ \psi_d = L_{1d} \cdot i_d + \psi_{mag}; \\ u_q = R_1 \cdot i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + p_p \cdot \omega \cdot \psi_d; \\ \psi_q = L_{1q} \cdot i_q. \end{cases}$$

где  $u_d, u_q, i_d, i_q, \psi_d, \psi_q$  – проекции векторов напряжения тока статора и потокосцепления на оси вращающейся системы координат;  $L_{1d}$  и  $L_{1q}$  – полные индуктивности обмоток статора по продольной и поперечной осям;  $R_1$  – активное сопротивление фазных обмоток;  $\psi_{mag}$  – вектор потокосцепления статора относительно магнитного потока ротора;  $p_p$  – число пар полюсов;  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора.

Мощность, потребляемая ВД от сети и представляющая собой сумму мгновенных мощностей фаз статора, определяется выражением

$$\begin{aligned} P_{ptr} &= \frac{3}{2} (u_d \cdot i_d + u_q \cdot i_q) = \\ &= \frac{3}{2} \left( R_1 \cdot (i_d^2 + i_q^2) + \frac{d\psi_d}{dt} \cdot i_d + \frac{d\psi_q}{dt} \cdot i_q + \right. \\ &\quad \left. + p_p \cdot \omega \cdot (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d) \right). \end{aligned}$$

В этом выражении можно выделить три слагаемых:

$$P_{CU} = \frac{3}{2} \cdot R_1 \cdot (i_d^2 + i_q^2);$$

– мощность активных потерь в меди статора

$$P_{MG} = \frac{3}{2} \left( \frac{d\Psi_d}{dt} \cdot i_d + \frac{d\Psi_q}{dt} \cdot i_q \right);$$

– составляющая мощности, характеризующая приращение электромагнитной энергии, запасаемой в обмотках статора

$$P_{EM} = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot \omega \cdot (\Psi_d \cdot i_q - \Psi_q \cdot i_d);$$

– электромагнитная мощность.

Момент вращения ВД можно выразить через электромагнитную мощность и угловую скорость вращения ротора

$$\begin{aligned} M_{VD} &= \frac{P_{EM}}{\omega} = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot (\Psi_d \cdot i_q - \Psi_q \cdot i_d) = \\ &= \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot (\Psi_{mag} + i_d \cdot (L_{1d} - L_{1q})) \cdot i_q. \end{aligned}$$

При  $L_{1d} = L_{1q}$  электромагнитный момент двигателя однозначно определяется составляющей тока  $i_q$ . Следовательно, наиболее экономичным режимом работы ВД является такой, при котором обеспечивается равенство нулю тока  $i_d$ , что соответствует наименьшему значению тока, потребляемого при данной нагрузке. Если ВД имеет явно выраженные полюса, индуктивности обмотки статора по продольной и поперечной осям различны. В этом случае момент вращения ВД зависит от обеих составляющих тока, а модуль вектора тока статора (полный ток потребления ВД) определяется выражением:

$$\begin{aligned} I_m &= \sqrt{i_d^2 + i_q^2} = \\ &= \sqrt{i_d^2 + \left( \frac{2 \cdot M_{VD}}{3 \cdot p_p} \right)^2 \cdot \frac{1}{(\Psi_{mag} + i_d \cdot (L_{1d} - L_{1q}))^2}}. \end{aligned}$$

Значения составляющих  $i_q$  и  $i_d$ , обеспечивающие минимальный ток потребления ВД при заданной нагрузке, могут быть получены из условия ( $M_{VD} = \text{const}$ )

$$\begin{cases} i_d = \arg \min_{i_d \in [-I_{\max}, 0]} (I_m(i_d, M_{VD})) \\ i_q = \sqrt{\left( \min_{i_d \in [-I_{\max}, 0]} (I_m(i_d, M_{VD})) \right)^2 - i_d^2}. \end{cases}$$

Целью данной работы является исследование характеристик тягового ВД в области допустимых тягово-скоростных режимов, характерных для ГСУ, при оптимальном соотношении токов  $i_q$  и  $i_d$ . В качестве критерия оптимальности выбран максимум электромагнитного момента  $M_{VD}$ , приходящегося на единицу тока потребления  $I_m$ . На границах области допустимых управлений перераспределение токов  $i_q$  и  $i_d$  осуществляется таким образом, что бы электромагнитный момент ВД был максимально близок к заданному.

### Работа вентильного двигателя в установившемся режиме

При работе ВД в двигательном установившемся режиме ( $di_d/dt = 0$ ;  $di_q/dt = 0$ ;  $M_{VD} \in [0, M_{VD\max}]$ ) можно записать

$$\begin{cases} u_d = R_1 \cdot i_d - p_p \cdot \omega \cdot L_{1q} \cdot i_q; \\ u_q = R_1 \cdot i_q + p_p \cdot \omega \cdot L_{1d} \cdot i_d + p_p \cdot \omega \cdot \Psi_{mag}; \\ M_{VD} = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot (\Psi_{mag} + i_d \cdot (L_{1d} - L_{1q})) \cdot i_q. \end{cases}$$

Будем считать, что область допустимых режимов работы ВД ограничена соотношениями

$$\sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{\max}; \quad \sqrt{u_d^2 + u_q^2} \leq U_{\max},$$

где  $I_{\max}$  – максимально допустимый ток фазы, обусловленный особенностями ВП или тепловыми ограничениями;  $U_{\max}$  – максимально допустимое напряжение фазы  $U_{\max} = U_{DC} / \sqrt{3}$ ;  $U_{DC}$  – постоянное напряжение тяговой бортовой сети.

Из статической модели ВД для области допустимых режимов работы можно получить следующее уравнение электрического равновесия

$$\begin{aligned} U_m^2 &= (R_1 \cdot i_d - p_p \cdot \omega \cdot L_{1q} \cdot i_q)^2 + \\ &+ (R_1 \cdot i_q + p_p \cdot \omega \cdot L_{1d} \cdot i_d + p_p \cdot \omega \cdot \Psi_{mag})^2, \end{aligned}$$

где  $U_m = \sqrt{u_d^2 + u_q^2}$  – модуль вектора фазного напряжения ВД. Решив данное уравнение

относительно  $i_d$ , можно определить соотношение, связывающее продольную и поперечную составляющие токов при заданных  $U_m$  и  $\omega$

$$i_d = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a},$$

где

$$a = R_1^2 + (\omega_e \cdot L_{1d})^2;$$

$$b = 2 \cdot \omega_e \cdot (\omega_e \cdot L_{1d} \cdot \Psi_{mag} + (L_{1d} - L_{1q}) \cdot R_1 \cdot i_q);$$

$$c = \left( R_1^2 + (\omega_e \cdot L_{1q})^2 \right) \cdot i_q^2 + 2 \cdot R_1 \cdot \omega_e \cdot \Psi_{mag} \cdot i_q + (\omega_e \cdot \Psi_{mag})^2 - U_m^2,$$

где  $\omega_e$  – скорость вращения электрического поля статора:  $\omega_e = p_p \cdot \omega$ .

Для ВД тягового электропривода, имеющего параметры, представленные в табл. 1, соотношение продольной и поперечной составляющих тока статора при  $U_m = \text{const}$  и  $\omega = \text{const}$  иллюстрирует рис. 1.

Таблица 1 Параметры вентильного двигателя

$\Psi_{mag}$ мВб	$L_{1q}$ мГн	$L_{1d}$ мГн	$R_1$ мОм	$p_p$ –	$I_{max}$ А
104	0,56	0,23	7,9	2	226,3

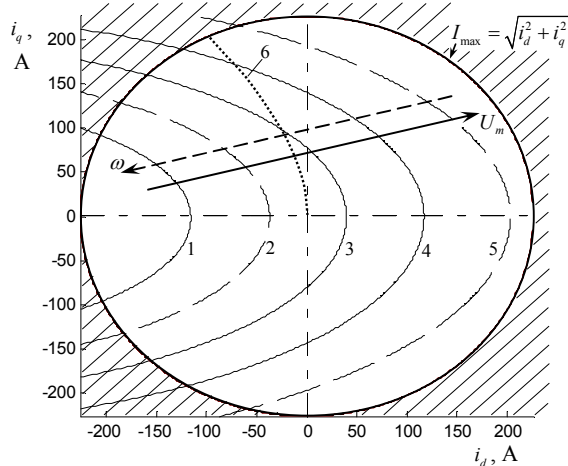


Рис. 1. Область допустимых рабочих режимов ВД: 1 –  $U_m = 130$  В,  $\omega = 840$  рад/с; 2 –  $U_m = 190$  В,  $\omega = 995$  рад/с; 3 –  $U_m = 190$  В,  $\omega = 840$  рад/с; 4 –  $U_m = 220$  В,  $\omega = 840$  рад/с; 5 –  $U_m = 190$  В,  $\omega = 630$  рад/с; 6 – зависимость  $i_q = f(i_d)$ , при которой обеспечивается максимум момента вращения, приходящегося на единицу тока потребления

Из рисунка видно, что кривые  $i_q = f(i_d)$  смещаются влево при увеличении скорости вращения ротора  $\omega$  и вправо при увеличении напряжения  $U_m$ . Кроме того, можно отметить, что при оптимальном соотношении продольной и поперечной составляющих тока статора и ограниченном напряжении питания ВД невозможно достичь достаточно высоких скоростей вращения ротора. Действительно, при высоких скоростях  $\omega_e$  ЭДС вращения  $E = \omega_e \Psi_{mag}$  достигает величины, близкой к максимально возможному напряжению статора  $U_{max}$ , что приводит к ограничению тока

$$i_q = \frac{u_q - \omega_e \cdot (L_{1d} \cdot i_d + \Psi_{mag})}{R_1}.$$

Поскольку непосредственное регулирование потока ротора в ВД на основе СДПМ невозможно, для расширения диапазона рабочих скоростей и улучшения динамических свойств двигателя применяют режим «ослабления поля», который заключается в увеличении на высоких скоростях отрицательной составляющей вектора тока по оси  $d$ .

На основе приведенных ранее уравнений для электромагнитных процессов статического режима ВД может быть построена векторная диаграмма (рис. 2).

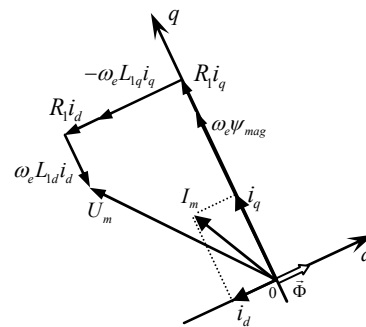


Рис. 2. Векторная диаграмма ВД

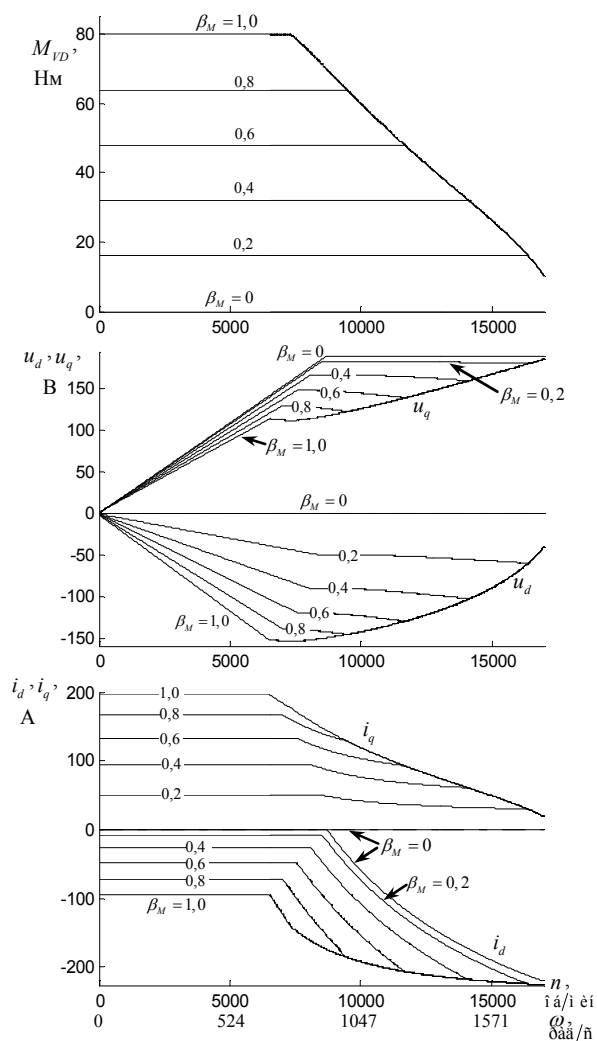
Из данной диаграммы видно, что наличие слагаемого  $\omega_e L_{1d} i_d$  при отрицательном значении тока  $i_d$  приводит к уменьшению напряжения  $U_m$  при том же значении ЭДС вращения. Очевидно, что применение такого способа регулирования приводит к увеличению суммарного тока статора  $I_m$  при заданном значении момента нагрузки. Однако, вместе с этим, применение режима ослабления поля позволяет значительно улучшить динамические качества ВД.

Пусть  $\beta_M \in [0,1]$  – сигнал управления электромагнитным моментом ВД

$$\beta_M = \frac{M_{VDzd}}{M_{VDmax}}$$

где  $M_{VDzd}$  – задаваемый электромагнитный момент;  $M_{VDmax}$  – максимальный момент вращения ВД.

Статические характеристики ВД при различных значениях  $\beta_M$ , соответствующие оптимальному соотношению продольной и поперечной составляющих тока статора, приведены на рис. 3. При построении данных характеристик были приняты следующие ограничения области допустимых режимов:  $I_{max} = 226,3$  А;  $U_{max} = 190$  В;  $M_{VDmax} = 80$  Нм.



В тех зонах области допустимых режимов работы, где невозможно поддерживать оптимальное соотношение продольной и поперечной составляющих токов, осуществлялось их перераспределение таким образом, чтобы общий ток потребления не превышал  $I_{max}$ , а электромагнитный момент вращения был максимально близок к заданному.

### Работа вентильного двигателя в режиме торможения

Для осуществления режима торможения ( $M_{VD} \in [-M_{VDmax}, 0]$ ) алгоритм управления ВП должен быть изменен таким образом, чтобы результирующий вектор намагничивающей силы статора отставал от вектора магнитного потока ротора. Векторная диаграмма ВД в этом случае примет вид, приведенный на рис. 4.

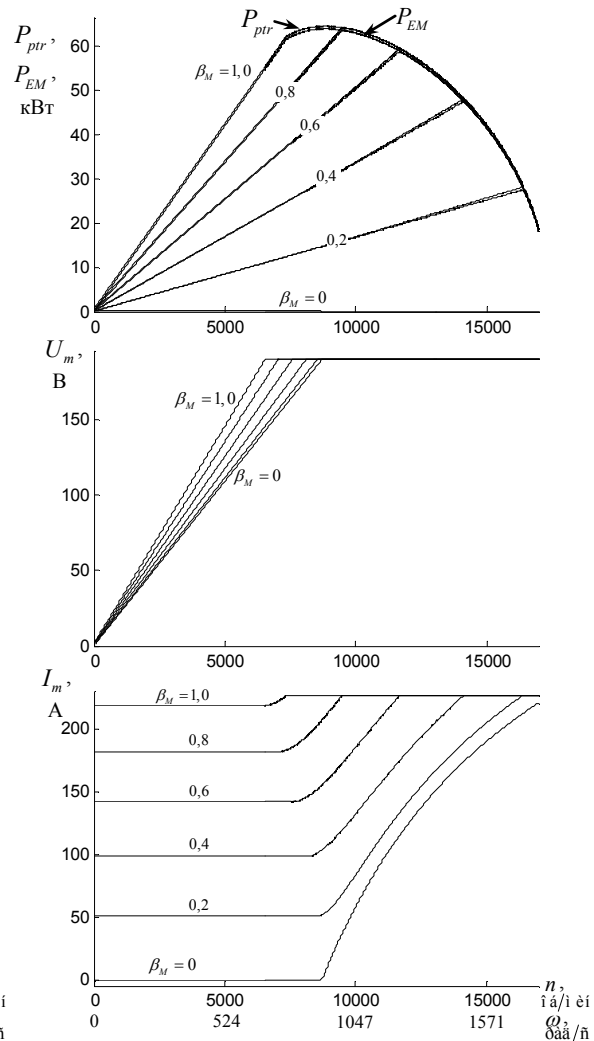


Рис. 3. Статические характеристики ВД с расширенным диапазоном скоростей ротора за счет применения режима ослабления поля

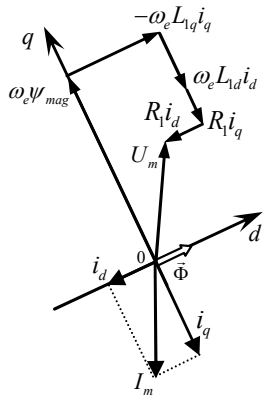


Рис. 4. Векторная диаграмма ВД в режиме торможения

Соотношение продольной и поперечной составляющих тока, которое обеспечивает максимальный момент сопротивления вращению ротора, приходящийся на единицу тока нагрузки, может быть получено из выражения

для полного тока статора при условии  $dI_m/di_d = 0$  и отрицательных значениях  $M_{VD}$ .

Если допустить, что в режиме торможения сигнал управления электромагнитным моментом ВД принимает отрицательные значения:  $\beta_M \in [-1, 0]$ , можно получить статические характеристики режима торможения (рис. 5) при расширенном диапазоне допустимых скоростей вращения ротора за счет использования ослабления поля.

В тех зонах области допустимых режимов работы, где невозможно поддерживать оптимальное соотношение продольной и поперечной составляющих токов, осуществляется их перераспределение таким образом, чтобы общий ток, отдаваемый в нагрузку, не превышал  $I_{max}$ , а электромагнитный момент сопротивления был максимально близок к заданному.

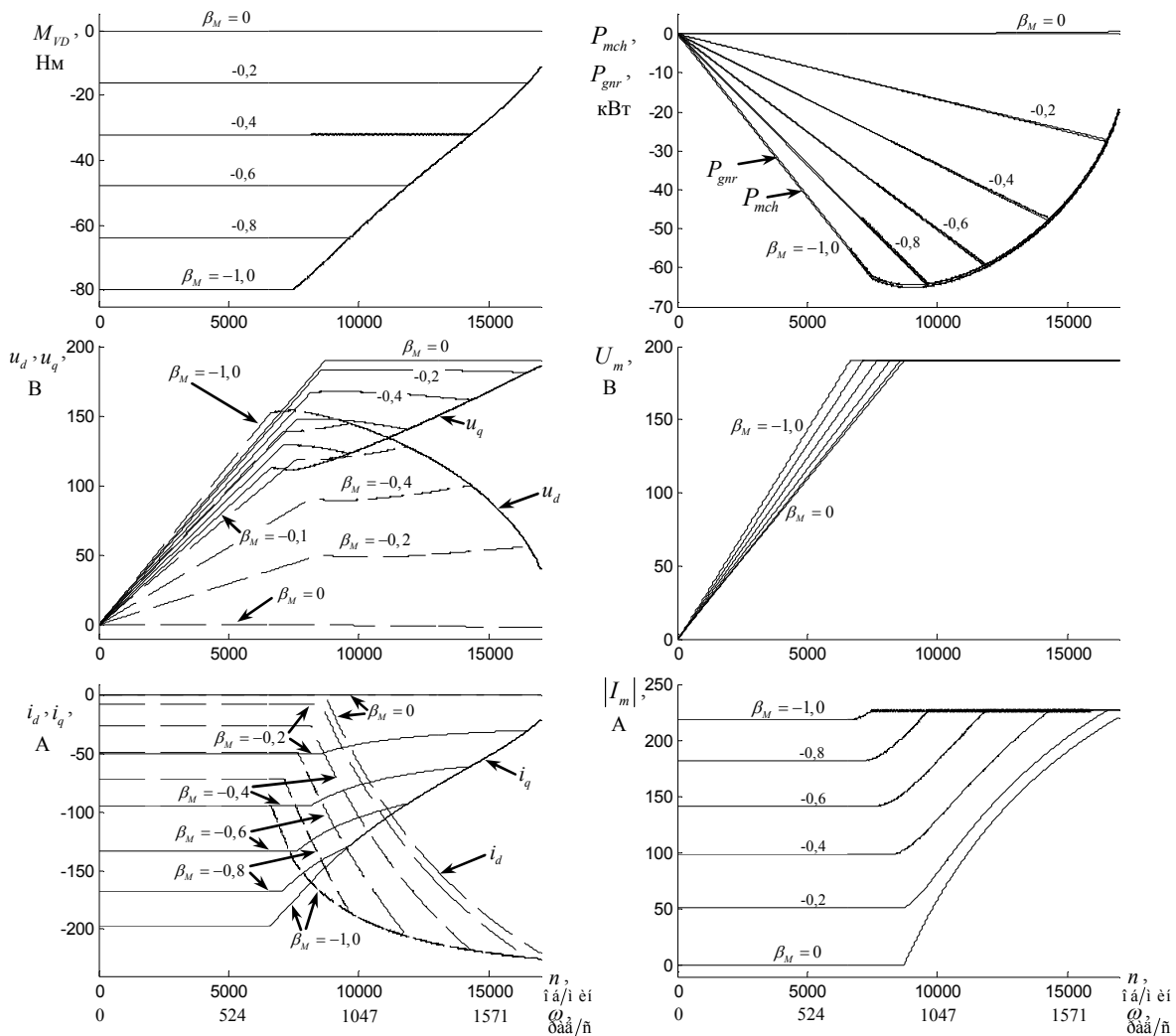


Рис. 5. Статические характеристики ВД в режиме торможения с расширенным диапазоном скоростей ротора за счет применения ослабления поля

Приведенные на рис. 5 зависимости для механической мощности были получены согласно выражению:

$$P_{mch} = M_{VD} \cdot \omega,$$

а зависимости для мощности, отдаваемой в нагрузку, согласно выражению:

$$P_{gr} = \frac{3}{2} (u_d \cdot i_d + u_q \cdot i_q).$$

Наблюдаемый резкий рост продольной составляющей тока статора  $i_d$  при высоких скоростях вращения ротора, в том числе и при  $\beta_m = 0$ , обусловлен необходимостью компенсации ЭДС вращения для обеспечения выполнения условия  $U_m \leq U_{max}$ ,  $U_m = \sqrt{u_d^2 + u_q^2}$ .

### Выводы

Получены зависимости составляющих вектора тока статора от тягово-скоростного режима ВД, обеспечивающие максимум электромагнитного момента  $M_{VD}$ , приходящегося на единицу тока  $I_m$ .

Исследованы особенности работы тягового ВД в области допустимых режимов работы, в том числе и в зоне использования режима «ослабления поля».

Полученные зависимости могут быть использованы при моделировании системы управления ВД в составе ГСУ.

### Литература

1. Бажинов О.В., Смирнов О.П., Сериков С.А., Гнатов А.В., Колесников А.В. Гибридные автомобили. – Харьков: ХНАДУ, 2008. – 327 с.

2. Сериков С.А. Постановка задачи оптимального управления гибридной силовой установкой // Вестник ХНАДУ: Сб. научн. тр. – Харьков: ХНАДУ. – 2008. – Вып. 43. – С. 95–100.
3. Сериков С.А. Синтез оптимального управления гибридной силовой установкой // Проблемы управления и информатики. – 2009. – №2. – С. 37–47.
4. Сериков С.А., Бороденко Ю.Н. Силовая установка гибридного автомобиля как объект управления // Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту. Науковий журнал. – Донецьк: ПП «Молнія», 2009. – №3. – С. 45–50.
5. Гусевский Ю.И., Демченко Ф.О., Загарий Г.И., Семчук Р.В., Дука А.К., Гусев И. Управление синхронными двигателями с постоянными магнитами в области скоростей выше номинальной // Інформаційно-керуючі системи не залізничному транспорті. – 2006. – №4. – С. 74–79.
6. Дука А.К., Чернышев В.М., Демченко Ф.О., Загарий Г.И., Семчук Р.В. Моделирование тягового частотно управляемого электропривода на базе синхронных двигателей с постоянными магнитами // Інформаційно-керуючі системи не залізничному транспорті. – 2006. – №5–6. – С. 80–86.
7. Oskar Wallmark. On control of permanent-magnet synchronous motors in hybrid-electric vehicle applications. Technical reports at the school of electrical engineering. Department of electric power engineering. Chalmers university of technology. Sweden. – 2004. – 115 p.

Рецензент: О.П. Алексеев, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 13 августа 2009 г.