

# Состояние и оценки качества работы электропривода

## переменного тока

**В статье изложены теоретически установленные взаимосвязи между механическими силами, энергией, запасаемой в обмотках двигателя, потерями и напряжением, требуемым для функционирования электрической машины.**

Юрий Филюшов, к. т. н.

filushov@mail.ru

Любая система управления (в том числе электрическая машина) должна наилучшим образом отвечать тем требованиям, которые к ней предъявляются. Наиболее общими являются требования к динамическим и энергетическим свойствам, но их противоречивость заставляет искать условия наилучшего управления. Поиск таких условий является многокритериальной задачей, а решение неизбежно приводит к необходимости сопоставить между собой отдельные требования, что выполняется посредством весовых коэффициентов. Однако назначение этих коэффициентов осуществляется произвольно или, в лучшем случае, по некоторым экспертным оценкам, что не позволяет строить качественные системы управления, наилучшим образом реализующие требуемые свойства.

Желание повысить эффективность процессов электромеханического преобразования энергии заставляет разработчиков улучшать энергетические характеристики работы электрической машины путем увеличения массы активных материалов. К примеру, повышение номинального значения  $\eta$  на 7–8% достигается за счет увеличения массы активных материалов двигателя на 40–50%. Но эти дорогостоящие решения в значительной мере утрачивают свое преимущество, если часть цикла электрическая машина работает не в номинальном режиме [1].

В силу сложности математического описания и неоднозначности формальной части применение вариационных методов для решения задач оптимального управления машиной переменного тока не нашло своего широкого применения. Трудности выбора критерия оптимальности объясняются тем, что требования, предъявляемые к работе электропривода, противоречивы, а сложность решения задачи управления зависит от сложности функционала. Если функционал отвечает большому количеству требований к работе электрической машины, то аналитический синтез управляющих воздействий практически невозможен. Чтобы избежать ошибочных результатов субъективного сопоставления требований, предъявляемых к электроприводу, необходимо в явном виде определить зависимость оценок

основных свойств работы электрической машины от закона управления.

В работе ставится задача выявить взаимосвязь основных характеристик работы электрической машины. Ее решение основано на исследовании процессов электромеханического преобразования энергии, что, в совокупности с теорией оптимального управления, позволит осуществить синтез управляющих воздействий для оптимальной работы машины переменного тока [2]. В качестве математического описания принята система уравнений Кирхгофа, описывающая состояние обобщенной электрической машины в системе координат  $d, q$ , ориентированной по току ротора  $i_{rq} = 0$ ,  $i_{rd} = i_p$ , вращающейся со скоростью ротора  $\omega$ :

$$U = RI + \Omega\Psi + d\Psi/dt. \quad (1)$$

Взаимосвязь токов и потокоцеплений определена следующим выражением:

$$I = L^{-1}\Psi. \quad (2)$$

$$U = \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \\ u_{rd} \\ u_{rq} \end{pmatrix}; \Psi = \begin{pmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_{rd} \\ \Psi_{rq} \end{pmatrix}; R = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{pmatrix};$$

$$\Omega = \begin{pmatrix} 0 & -\omega & 0 & 0 \\ \omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; L = \begin{pmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{pmatrix},$$

где:  $U, I, \Psi$  — вектор напряжений, вектор токов и потокоцеплений;  $u_d, u_q, u_{rd}, u_{rq}$  — проекции вектора напряжения статора и ротора, подводимого к обмоткам двигателя;  $i_d, i_q, i_{rd}, i_{rq}, \Psi_d, \Psi_q, \Psi_{rd}, \Psi_{rq}$  — соответствующие токи и потокоцепления статора и ротора в системе рассматриваемых координат;  $L, R, \Omega$  — матрицы индуктивностей, сопротивлений



тепловые потери в электрической машине при любом значении электромагнитного момента будут наименьшими. Минимум функции энергетического состояния  $F(\varphi, \beta)$

$$F_{\min} = (2\sqrt{R_r R})/L_m$$

определяет положение изображающих векторов

$$\partial F(\beta, \varphi)/\partial \beta = 0; F(\beta, \varphi)/\partial \varphi = 0;$$

$$\begin{aligned} \varphi &= \arcsin \left( L_s \sqrt{\frac{R_r}{R_r L_s^2 + R L_m^2}} \right); \\ \beta &= \arcsin \left( L_s \sqrt{\frac{R_r}{R_r L_s^2 + R L_m^2}} \right), \end{aligned} \quad (13)$$

при котором формирование электромагнитного момента может осуществляться при абсолютном минимуме тепловых потерь. Такое положение изображающих векторов определяет максимальное значение электромагнитного момента в условиях ограничения тока и обеспечивает наилучшие условия электромеханического преобразования энергии. В этих условиях изменение нагрузки определяет значительное изменение потокосцеплений, что требует существенного запаса по напряжению для быстрого формирования электромагнитного момента.

Возникает необходимость найти положение изображающих векторов, при котором формирование электромагнитного момента осуществляется в условиях потенциально реализуемых силовых характеристик, наилучшим образом отвечающих динамическим и энергетическим требованиям, при ограничении напряжения, подводимого к обмоткам электрической машины.

Для этой цели в уравнение баланса мощностей (3) подставлены выражения (8) и (10):

$$P = \frac{1}{2} \frac{dmf(\beta, \varphi)}{dt} + \omega m + mF(\beta, \varphi). \quad (14)$$

Из уравнения (14) следует, что состояние электрической машины может быть определено с помощью четырех независимых переменных. В качестве таких переменных выбраны: электромагнитный момент  $m$ ,  $\omega$  — угловая скорость вращения ротора;  $\beta$ ,  $\varphi$  — два аргумента, которых достаточно для определения положения всех изображающих векторов. Переменные  $m$  и  $\omega$  заданы условиями технологической задачи. Варьируемыми величинами являются аргументы  $\beta$ ,  $\varphi$ , посредством которых осуществляется поиск условий управления, отвечающих желаемым требованиям. Выбор аргументов определяется удобством анализа системы.

При неизменных аргументах  $\beta$ ,  $\varphi$ , полагая, что скорость вращения электрической машины в процессе формирования электромагнитного момента изменится незначительно, уравнение баланса мощностей (14) разрешено относительно электромагнитного момента:

$$m = \frac{P}{\omega + F(\beta, \varphi)} \left( 1 - e^{-\frac{2t}{T_\Delta}} \right). \quad (15)$$

Из полученного решения следует, что мгновенная величина электромагнитного момента зависит от мощности, подводимой к обмоткам электрической машины, угловой скорости вращения и значения функции энергетического состояния  $F(\varphi, \beta)$ . Длительность процессов электромеханического преобразования энергии (15) зависит от параметра времени  $T_\Delta$ :

$$T_\Delta = f(\beta, \varphi)/(\omega + F(\beta, \varphi)). \quad (16)$$

Параметр времени  $T_\Delta$  характеризует интенсивность процессов электромеханического преобразования энергии. Этот показатель качества зависит от значений функций энергетического состояния  $F(\varphi, \beta)$ ,  $f(\varphi, \beta)$  и угловой скорости вращения ротора. При неизменном положении изображающих векторов регулируемые переменные изменяются пропорционально и с одинаковым темпом. Эти условия определяют оптимальное по быстродействию формирование электромагнитного момента при тех или иных энергетических ограничениях [5]. В силу зависимости от произведения регулируемых переменных (5), изменяющихся с одинаковым темпом, темп изменения электромагнитного момента (15) в два раза выше параметра времени  $T_\Delta$  [с]. Существующие противоречия эффективности работы электрической машины разрешаются посредством установленной взаимосвязи между коэффициентом полезного действия  $\eta$ :

$$\eta = m\omega / (m\omega + \Delta P) = \omega / (\omega + F(\beta, \varphi)) \quad (17)$$

и параметром времени (16), характеризующим интенсивность процессов электромеханического преобразования энергии. Совместное решение (16) и (17) позволяет выявить аналитическую зависимость оценок силовых характеристик работы электрической машины:

$$T_\Delta = f(\beta, \varphi)\eta/\omega. \quad (18)$$

Задаваясь желаемой величиной коэффициента полезного действия  $\eta$  электромеханического преобразования энергии (17), всегда возможно определить зависимость функции энергетического состояния (10) от скорости вращения ротора. На основании полученной зависимости можно выявить аналитическое выражение, связывающее аргументы  $\beta$ ,  $\varphi$ , при которых все значения функции энергетического состояния  $F(\varphi, \beta)$  отвечают заданным энергетическим требованиям. Подставив выражение, связывающее аргументы  $\beta$ ,  $\varphi$ , в функцию (8), ее можно выразить посредством одного аргумента.

Такое решение позволит определить положение изображающих векторов для каждого значения угловой частоты вращения ротора, которое доставляет минимум  $f(\varphi, \beta)$  при заданном значении  $\eta$ . Рациональная вариация аргументов  $\varphi$ ,  $\beta$  должна осуществляться в интервале между двумя крайними положениями, доставляющими минимум функций энергетического состояния. Задаваясь величиной  $\eta$  электромеханического преобразователя энергии, всегда

можно определить положение векторов, при котором изменение электромагнитного момента осуществляется при минимальной мощности, подводимой к обмоткам двигателя, и наоборот, что позволит выявить решение, наилучшим образом отвечающее требованиям, предъявляемым к работе машины переменного тока.

В зависимости от способа управления, реализуемого в электроприводе, на обмотках двигателя необходимо формировать напряжение. Оценка свойств будет не полной без оценки величины и эффективности использования напряжения, подводимого к обмоткам электрической машины. Для этой цели введена функция энергетического состояния  $f_u(\beta, \varphi)$  [6], устанавливающая зависимость между  $u$  модулем напряжения статора и  $m$  электромагнитным моментом:

$$f_u(\beta, \varphi) = u^2/Rm, \quad (19)$$

где  $u = \sqrt{u_d^2 + u_q^2}$ .

Приняв обозначение  $T_s = L_s/R_s$ , функцию энергетического состояния  $f_u(\beta, \varphi)$  можно представить следующим образом:

$$f_u(\beta, \varphi) = \frac{tg\varphi^2 + [1 + \omega T_s (ctg\beta + tg\varphi)]^2}{T_s (ctg\beta + tg\varphi)}. \quad (20)$$

При заданной скорости вращения ротора аргументами этой функции являются величины, характеризующие положение изображающих векторов. В зависимости от положения изображающих векторов при фиксированном значении угловой частоты вращения ротора на рис. 4 представлена поверхность значений  $f_u(\beta, \varphi)$ .

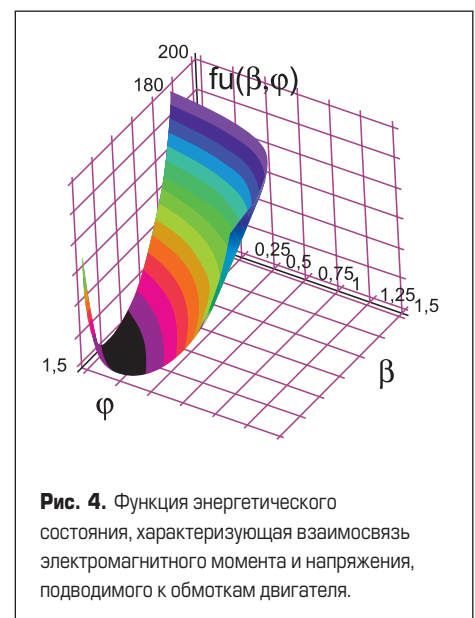


Рис. 4. Функция энергетического состояния, характеризующая взаимосвязь электромагнитного момента и напряжения, подводимого к обмоткам двигателя.

На основании (20) определена зависимость максимальной скорости  $\omega_m$  вращения ротора от величины электромагнитного момента при различном положении изображающих векторов в условиях существующих ограничений напряжения  $u_{огр}$  (21).

$$\omega_m = \frac{\sqrt{u_{огр}^2 (ctg\beta + tg\varphi) Rm \cos \varphi^2 T_s - R^2 m^2 \sin \varphi^2 - Rm \cos \varphi}}{R T_s \cos \varphi (ctg\beta + tg\varphi)}. \quad (21)$$

Условия, выполнение которых позволит передать исполнительному механизму максимальное значение мощности при ограничении напряжения, подводимого к обмоткам двигателя, определяются следующим выражением:

$$\beta = \arctg \frac{\omega T_s \cos \varphi}{1 - \omega T_s \sin \varphi}. \quad (22)$$

Для синхронной машины в условиях  $\cos \varphi = 1$  минимально возможную величину напряжения, требуемого для передачи исполнительному механизму желаемой мощности, можно получить, подставив (22) в (21) или (20):

$$U_{\min} = 2\sqrt{R\omega m}. \quad (23)$$

На основании (23), пренебрегая механическими возможностями конструкции электрической машины, выражение для максимального значения скорости вращения ротора  $\omega$  при ограничении напряжения и заданном значении электромагнитного момента можно записать следующим образом:

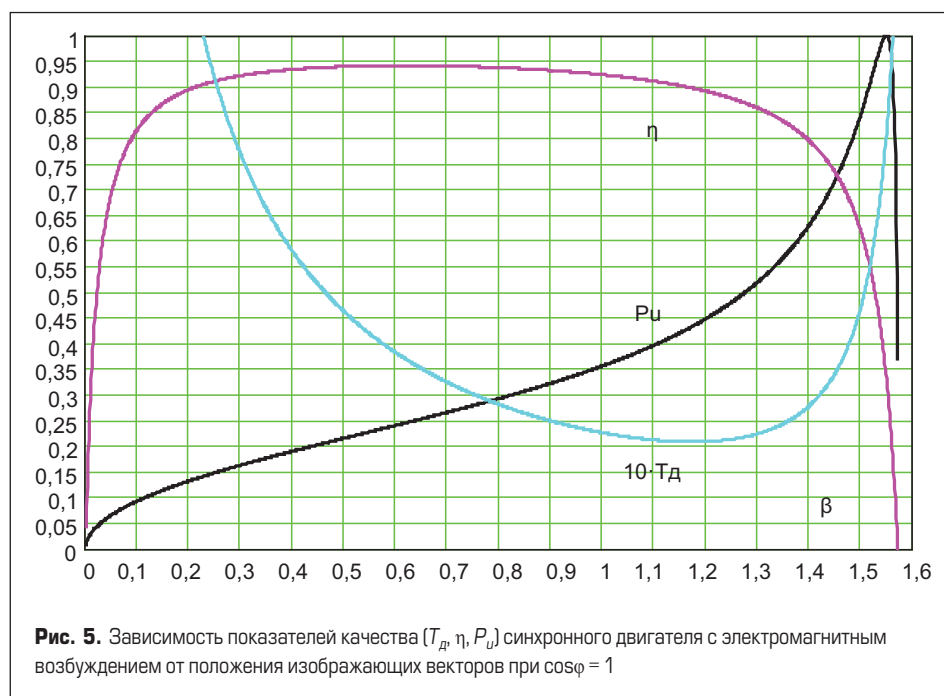
$$\omega = U_{\min}^2 / 4Rm. \quad (24)$$

В качестве критерия оценки эффективности использования электроприводом напряжения при различных способах формирования электромагнитного момента выбрано отношение значения напряжения  $U_{\min}$  к величине напряжения  $U$ , требуемого для реализации оцениваемого закона управления. Обозначим оценку по этому критерию как  $P_u$ :

$$P_u = U_{\min} / U = 2\sqrt{\omega / f_u(\beta, \varphi)}.$$

В предельном режиме работы значение  $P_u = 1$ ; при любом другом способе управления величина этой оценки меньше единицы. Такой критерий качества позволит оценить эффективность использования напряжения, подводимого к обмоткам двигателя для функционирования электропривода при различных способах формирования электромагнитного момента и изменяющейся нагрузке. Введение такой оценки в совокупности с оценками интенсивности электромеханического преобразования энергии (18) и оценкой энергетических свойств работы электрической машины (17) позволит определить положение изображающих векторов, обеспечивающие наиболее полное использование потенциальных возможностей электрической машины и источника питания для удовлетворения желаемых требований, предъявляемых к электроприводу [7].

На рис. 5 представлены линии значений показателей качества работы синхронной машины при  $\cos \varphi = 1$  и различных значениях аргумента  $\beta$ . На представленном рисунке хорошо просматривается зависимость основных свойств работы электрической



машины от положения изображающих векторов. Для асинхронного короткозамкнутого двигателя, в силу взаимосвязи регулируемых переменных, основные свойства работы электрической машины зависят от одного аргумента.

### Основные результаты

- Определены функции энергетического состояния  $f(\varphi, \beta)$ ,  $F(\varphi, \beta)$ ,  $f_u(\varphi, \beta)$ , устанавливающие взаимосвязь между механическими силами, энергией, запасаемой в обмотках двигателя, потерями и напряжением, необходимым для функционирования электрической машины.
- Минимум  $f(\varphi, \beta)$  определяет условия, при которых изменение электромагнитного момента может осуществляться при минимальной мощности, подводимой к обмоткам двигателя.
- Минимум функции  $F(\varphi, \beta)$  определяет условия, при которых тепловые потери в обмотках электрической машины имеют абсолютный минимум.
- Минимум  $f_u(\varphi, \beta)$  определяет условия, при которых к обмоткам двигателя можно подвести минимум напряжения, требуемого для передачи исполнительному механизму установленной мощности.
- Введена оценка интенсивности электромеханического преобразования энергии, представляющая собой параметр времени  $T_d$ .
- Рассмотрен критерий качества, позволяющий оценить величину напряжения и эффективность его использования при различных способах управления электрической машиной. Установлено, что оценки качества  $T_d$  и  $P_u$ , как и оценка  $\eta$  энергетической эффективности работы электрической машины, зависят от скорости вращения ротора и положения изображающих векторов.
- Показана аналитическая зависимость между оценкой энергетических свойств работы

электрической машины и оценкой интенсивности процессов электромеханического преобразования энергии.

### Литература

1. Ильинский Н. Ф., Сарбатов Р. С. Научно-технические аспекты проблемы повышения эффективности использования энергии в массовом электроприводе. Автоматизированный электропривод. М.: Энергоатомиздат. 1986.
2. Филюшов Ю. П. Оптимизация работы обобщенной электрической машины // Электричество. 2011. № 2.
3. Иванов-Смоленский А. В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. Уч. пособие для вузов. М.: Высшая школа. 1989.
4. Филюшов Ю. П. Система управления синхронным двигателем с электромагнитным возбуждением, минимизирующая потери энергии. Автоматизированные электро-механические системы. Сб. науч. трудов. Новосибирск: НГТУ. 1994.
5. Филюшов Ю. П., Филюшов В. Ю. Оптимизация электромагнитных процессов в синхронной машине // Электричество. 2011. № 8.
6. Боченков Б. М., Филюшов Ю. П. Условия рационального преобразования энергии в электрической машине при ограниченном значении напряжения статора. Автоматизированные электро-механические системы. Коллективная монография. Под ред. В. Н. Аносова. Новосибирск: НГТУ. 2004.
7. Филюшов Ю. П. Оценка эффективности процесса преобразования энергии в зависимости от применяемого алгоритма управления электрической машиной. Автоматизированные электро-механические системы. Сб. науч. трудов. Новосибирск: НГТУ. 1998.