УДК 62 – 51: 62 - 526: 629.423.3

Г. М. СИМАКОВ д.т.н. профессор НГТУ
Ю.П. ФИЛЮШОВ к.т.н. инженер ФГУП ПО «Север»
г. Новосибирск

СВЯЗЬ ФУНКЦИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ С ПРОЦЕССАМИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В МАШИНАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Рассмотрены условия преобразования энергии, подводимой к обмоткам двигателя, за минимальное время при ограничении мощности и начальных условиях равных нулю.
Ключевые слова: электромеханическое преобразование энергии, связи силовых характеристик, взаимосвязанные оценки качества.

Исследование процессов электромеханического преобразования энергии, позволило выдвинуть утверждение о существовании взаимных связей между основными оценками качества работы электрической машины переменного тока. Для доказательства этого положения, в работе рассматривается влияние на процессы электромеханического преобразования энергии взаимосвязей силовых и энергетических характеристик [1] машин переменного тока. В качестве таких характеристик выступают электромагнитный момент *m*, тепловые потери *ΔP*, энергия магнитного поля *w* и напряжение *U*, подводимое к обмоткам электрической машины.

Связь силовых и энергетических характеристик установлена в виде функций, зависящих от положения векторов [2] электрической машины:

$$f(\beta,\varphi)=\frac{2w}{m}=\frac{1}{p(ctg\beta+tg\varphi)}\left(\frac{1}{\cos\varphi^2}+\frac{L_r L_s}{L_m^2\sin\beta^2}-2+2tg\varphi\ ctg\beta\right);$$

$$F(\beta,\varphi)=\frac{\Delta P}{m}=\frac{1}{p(ctg\beta+tg\varphi)}\left(\frac{R_s}{L_s\cos^2\varphi}+\frac{R_r}{L_m^2}\frac{L_s}{\sin^2\beta}+ZL_m(ctg\beta+tg\varphi)(p\omega)^{1.5}\right);$$

$$f_u(\beta,\varphi)=\frac{U^2}{R_s m}=\frac{tg\varphi^2+\left[1+\omega T_s(\mathrm{ctg}\,\beta+\mathrm{tg}\,\varphi)\right]^2}{pT_s(\mathrm{ctg}\,\beta+\mathrm{tg}\,\varphi)}.$$

(1)

Здесь φ – угол, характеризует положение вектора *ЭДС* от потокосцепления статора относительно тока статора, β – угол, определяет положение вектора потокосцепления статора относительно тока ротора; остальные

обозначения соответствуют общепринятым обозначениям для машин переменного тока.

Обычно, для повышения быстродействия системы управления, используют форсирующие регуляторы, обеспечивающие увеличение напряжения и мощности, подводимой к обмоткам двигателя. При этом интенсивность процессов электромеханического преобразования энергии увеличивается. Но рост мощности имеет свои ограничения. Рассмотрим возможность повышения темпа процессов электромеханического преобразования энергии, в условиях ограничения мощности, подводимой к обмоткам двигателя.

В работе [3] установлено, при начальных условиях равных нулю, управление состоянием электрической машины за минимальное время должно происходить при пропорциональном и с одинаковым темпом изменении регулируемых переменных. Для оптимизации процессов это условие определяет неизменное положение вектора регулируемых переменных в статических и динамических режимах работы электропривода.

Возникает необходимость определить аргументы, характеризующие положение регулируемых переменных [4], при которых преобразование энергии осуществляется за минимальное время в условиях ограничения мощности P_{ref}, подводимой к обмоткам двигателя.

Решение этой задачи для электрической машины выполнено с помощью метода Эйлера - Лагранжа, используя в качестве критерия качества [5], время:

$$T = \int_{t1}^{t2} 1 dt = t_2 - t_1 \ . \qquad (2)$$

Используя функции (1), при неизменных аргументах β, φ и полагая, что скорость вращения ротора электрической машины в процессе формирования электромагнитного момента изменится незначительно, уравнение баланса мощностей:

$$P_{ref} = \frac{dw}{dt} + \omega m + mF(\beta, \varphi) \ , \qquad (3)$$

будем рассматривать как уравнение связи. Лагранжиан представлен следующим уравнением:

$$L(t, w, \dot{w}, P) = H - s_2 \dot{w} \ ,$$

здесь H - функция Гамильтона:

$$H = s_1 + s_2 \left[P_{ref} - 2w \frac{\omega + F(\beta, \varphi)}{f(\beta, \varphi)} \right], \qquad (4)$$

s_1, s_2 – множители Лагранжа, являются функциями времени не равными тождественно нулю:

$$s_1 = -1, s_2 \neq 0 .$$

Уравнения Эйлера для множителей Лагранжа разрешено в следующем виде:

$$\frac{ds_2}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial w} = 2s_2 \frac{\omega + F(\beta,\varphi)}{f(\beta,\varphi)}; \; s_2 = e^{\frac{2[\omega+F(\beta,\varphi)]t}{f(\beta,\varphi)}} s_0, \;\; s_0 = P_{ref}^{-1}.$$

Решение уравнения Эйлера для основного уравнения, при начальных условиях равных нулю, дает экстремаль для выходной величины, в качестве которой выступает энергия, подводимая к обмоткам двигателя:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\partial H}{\partial s_2} = P_{ref} - 2w\frac{\omega + F(\beta,\varphi)}{f(\beta,\varphi)};$$

$$w = w_{ref}(1 - e^{-\frac{2t}{T_\partial}}), \;\; w_{ref} = \frac{1}{2}\frac{P_{ref} f(\beta,\varphi)}{[\omega + F(\beta,\varphi)]}. \qquad (5)$$

Из (5) следует, темп поступления энергии в обмотки двигателя, при преобразовании энергии в условиях ограничения мощности
полностью зависит от параметра времени T_∂:

$$T_\partial = \frac{f(\beta,\varphi)}{\omega + F(\beta,\varphi)}, \qquad (6)$$

характеризующего интенсивность процессов преобразования энергии. При неизменной частоте вращения ротора и аргументах, определяющих минимальное значение функции энергетического состояния $f(\varphi,\beta)$, этот параметр времени минимален, определяя максимальный темп электромеханического преобразования энергии в условиях ограничения мощности, подводимой к обмоткам двигателя. При неизменных аргументах β, φ, уравнение (5) может быть разрешено относительно электромагнитного момента:

$$m = \frac{P_{ref}}{[\omega + F(\beta,\varphi)]}(1 - e^{-\frac{2t}{T_\partial}}). \qquad (7)$$

Особенность выражений (5) и (6) заключается в том, что в условиях наложенных ограничений, они позволяют оценить влияние функций энергетического состояния на быстродействие системы. Поскольку функции энергетического состояния зависят от аргументов, определяющих положение векторов, всегда можно определить закон управления, обеспечивающий требуемое быстродействие системы управления в

условиях желаемых ограничений. Так как решение (5), при начальных условиях равных нулю, в совокупности с решениями для сопряженной системы, отвечают минимуму функции Лагранжа, независимо от значений аргументов β, φ, то для каждого сочетания аргументов φ, β, при котором возможно сформировать электромагнитный момент, решение (5) будет являться экстремалью. Сочетание аргументов φ, β, определяет те или иные свойства работы электрической машины. Существующие противоречия эффективности работы электрической машины разрешаются посредством установленной взаимосвязи между коэффициентом полезного действия η:

$$\eta = \frac{m\omega}{m\omega + \Delta P} = \frac{\omega}{\omega + F(\beta,\varphi)}, \qquad (8)$$

и оценочным параметром времени (6), характеризующим интенсивность процессов электромеханического преобразования энергии. Совместное решение (6) и (8) позволяет выявить аналитическую связь оценок основных свойств работы электрической машины:

$$T_{\partial} = \frac{f(\beta,\varphi)\eta}{\omega}[сек]. \qquad (9)$$

Задавая желаемую величину коэффициента полезного действия η электромеханического преобразования энергии (8), всегда возможно определить зависимость функции энергетического состояния (1) от скорости вращения ротора. На основании полученных уравнений можно выявить связь между аргументами β, φ, при которых все значения функции энергетического состояния $F(\varphi,\beta,)$ отвечают заданным энергетическим требованиям.

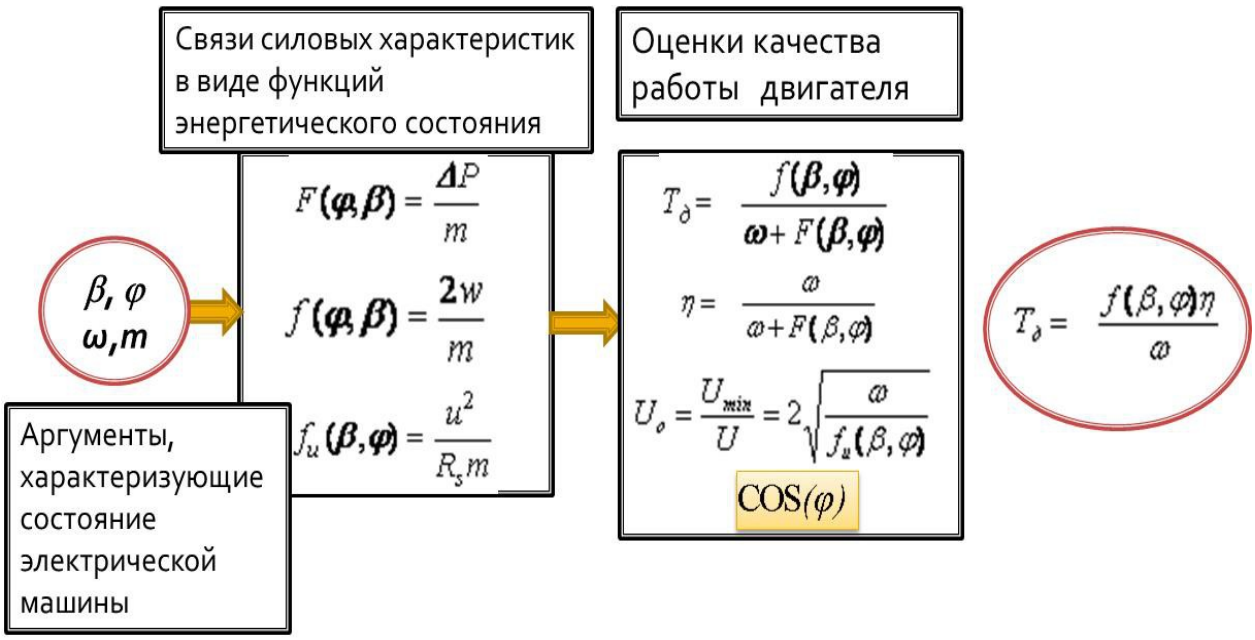

Рисунок 1. Связь основных оценок качества работы электрической машины

Подставив выражение, связывающее аргументы β, φ, в функцию $f(\varphi,\beta)$, ее можно выразить посредством одного аргумента [5]. Такое решение позволит определить положение векторов, для каждого значения угловой частоты вращения ротора, которое доставляет минимум $f(\varphi,\beta)$ при заданном значении η. Рациональная вариация аргументов φ, β, должна осуществляться в интервале между двумя крайними положениями, доставляющими минимум функциям энергетического состояния. Установленные связи оценок качества, представленные в виде структурной схемы на рисунке 1, позволяют, задаваясь одним показателем качества, определить положение векторов, при котором все остальные оценки качества будут иметь наилучшие значения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филюшов Ю. П. Оценка эффективности процесса преобразования энергии в двигателе в зависимости от применяемого алгоритма управления. // Автоматизированные электромеханические системы: *Сб. науч. трудов.* – Новосибирск: Изд. - во НГТУ, 1998. - С. 93 – 110.
2. Симаков Г. М. Оценка энергетических характеристик электропривода переменного тока в динамических режимах/ Г. М. Симаков, Ю. П. Филюшов // Первая международная научно конференция молодых ученых

«Электротехника, энергетика, машиностроение» - Новосибирск: Изд – во НГТУ, 2014. – С .36 - 40.
3. Филюшов Ю. П. Оптимизация работы обобщенной электрической машины / Электричество. 2011. № 2. С. 46 - 51.
4. Симаков Г. М. Метод последовательного синтеза энергетически эффективного управления электроприводом переменного тока / Г. М. Симаков, Ю. П. Филюшов //*16 научно – техническая конференция* «Электроприводы переменного тока»– ЭППТ 2015 (г. Екатеринбург).
5. Поляков В.Н. К развитию вопроса оптимизации установившихся режимов асинхронных электроприводов с частотным управлением / В.Н. Поляков // Научные школы УГТУ-УПИ № 6. Научные идеи В.А. Шубенко на рубеже веков. Материалы науч. техн. конф. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1999. С. 95–98.