щи асинхронного электропривода / П. Д. Гаврилов, Е. К. Ещин // Изв. вузов. Горный журнал. – 1978. – № 11. – С. 99-105.

8. *Ещин, Е. К.* Теория предельных режимов работы горных машин. – Томск: ТГУ, 1995. – 232 с.

9. *Бабокин, Г. И.* Система управления электроприводом с упругим звеном переменной жесткости // Горное оборудование и электромеханика. – 2007. – № 1. – С. 47-48.

10. *Завьялов, В. М.* Безынерционный источник момента на базе асинхронного электропривода / В. М. Завьялов, И. Ю. Семыкина // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях: Труды третьей Всероссийской научно-практической конференции, 16-18 мая 2006. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – С. 121-124.

11. *Красников, Ю. Д.* Оптимизация привода выемочных и проходческих машин / Ю. Д. Красников, З. Я. Хургин, В. М. Нечаевский и др. – М.: Недра, 1983. – 264 с.

12. Современная прикладная теория управления: синергетический подход в теории управления / Под ред. А. А. Колесникова. – Таганрог: ТРТГУ, 2000. – Ч. II. – 559 с.

13. *Лукас, В. А.* Теория автоматического управления техническими системами. – Екатеринбург: УГГА, 2002. – 675 с.

Автор статьи:

Завьялов
Валерий Михайлович
- канд.техн.наук, доцент,
зав. каф. электропривода и автоматизации КузГТУ.
Тел.8-3842-39-63-54.

УДК 62-83:005.22

И.Ю. Семыкина

ГРАДИЕНТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В РЕШЕНИИ ОСНОВНЫХ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Введение

Современное промышленное производство характеризуется стремлением к полной автоматизации всех технологических операций.

В этих условиях его неотъемлемой частью являются электрические приводы, на долю которых приходится подавляющая часть совершаемой работы.

Учитывая постоянно повышающиеся требования к качеству промышленной продукции, основной решаемой электроприводом задачей становится не просто приведение механизмов в движение, а, в первую очередь, управление механическими координатами элементов рабочих машин при их движении.

Данная задача отличается значительной сложностью, поскольку механические подсистемы электроприводов различных технологических установок существенно отличаются друг от друга, как по конструкции, так и по характеру совершаемых движений.

Несмотря на это, любые механические системы обладают общими свойствами, позволяющими формализовать задачу управления их координатами.

Согласно постулатам динамики твердого тела, изменение скорости любого механизма происходит под действием совокупности внешних сил, не зависящих от его движения. Из этого следует, что качественное управление координатами механизма возможно осуществить только в случае, когда имеется полностью управляемый источник входного силового воздействия механической подсистемы.

Для электропривода таким источником является электромагнитный момент двигателя.

Таким образом, его формирование является основополагающим элементом процесса управления механическими координатами электропривода, а основная задача управления работой электропривода сводится к обоснованному управлению процессом электромеханического преобразования энергии.

Постановка задачи управления

В настоящее время управление электромагнитным моментом электропривода, как самостоятельная задача, имеет большое количество вариантов решения, поскольку существуют электроприводы с различными типами электромеханических преобразователей энергии, а также множество подходов, применяемых к управлению электроприводами.

В общем случае, электромагнитный момент возникает в результате взаимодействия магнитных полей статора и ротора электродвигателя. При

этом момент одной и той же величины может быть получен при взаимодействии полей разной интенсивности и при различном их взаимном расположении, что наглядно показано на рис. 1.

Исходя из этого, при формировании требуемого электромагнитного момента возможна работа электродвигателя в энергетически неоптимальных режимах, что недопустимо с точки зрения эффективности.

Чтобы избежать таких режимов работы необходимо иметь возможность управлять потокосцеплением обмоток двигателя.

Таким образом, для качественного управления процессом электромеханического преобразования энергии достаточно решить три локальные задачи: формирование электромагнитного момента, потокосцепления обмотки статора и потокосцепления обмотки ротора.

Для получения обобщенного решения этих задач воспользуемся математическим описанием процесса электромеханического преобразования энергии в виде известной модели обобщенной электрической машины [1], выраженной через потокосцепления двигателя в произвольно вращающейся системе координат *u*-*v*:

$$\begin{aligned}
\frac{\psi_{1u}}{dt} &= -\sigma L_2 R_1 \psi_{1u} + \\
&+ \sigma L_{12} R_1 \psi_{2u} + \omega_k \psi_{1v} + u_{1u}; \\
\frac{\psi_{1v}}{dt} &= -\sigma L_2 R_1 \psi_{1v} + \\
&+ \sigma L_{12} R_1 \psi_{2v} - \omega_k \psi_{1u} + u_{1v}; \\
\frac{\psi_{2u}}{dt} &= \sigma L_{12} R_2 \psi_{1u} - \\
&-\sigma L_1 R_2 \psi_{2u} + (\omega_k - p\omega)\psi_{2v} + u_{2u}; \\
\frac{\psi_{2v}}{dt} &= \sigma L_{12} R_2 \psi_{1v} - \\
&- \sigma L_1 R_2 \psi_{2v} - (\omega_k - p\omega)\psi_{2u} + u_{2v},
\end{aligned} \tag{1}$$

где ψ_{1u}, ψ_{1v} и ψ_{2u}, ψ_{2v} – составляющие векторов потокосцепления статора и ротора соответственно; u_{1u}, u_{1v} и u_{2u}, u_{2v} – составляющие векторов напряжения, подводимого к статору и ротору; R_1, R_2 – активные сопротивления статора и ротора; L_1, L_2 – индуктивности статора и ротора; L_{12} – взаимная индуктивность; $\sigma = 1/(L_1L_2\text{-}L_{12}^2)$; p – количество пар полюсов; ω – угловая скорость вала двигателя; ω_k – угловая скорость системы координат.

Для этой модели поставленные задачи управления математически можно сформулировать в виде следующих целей:

$$\begin{aligned}
M &= K(\psi_{1v}\psi_{2u} - \psi_{1u}\psi_{2v}) = M^*; \\
\psi_1^2 &= \psi_{1u}^2 + \psi_{1v}^2 = \left(\psi_1^2\right)^*; \\
\psi_2^2 &= \psi_{2u}^2 + \psi_{2v}^2 = \left(\psi_2^2\right)^*,
\end{aligned} \tag{2}$$

где индексом x^* отмечены заданные величины; M – электромагнитный момент; ψ_1 и ψ_2 – амплитуды векторов потокосцепления статора и ротора соответственно; $K=pL_{12}\sigma$.

Применение метода скоростного градиента

Задача реализации целей управления (2) с учетом сложности математического описания объекта требует использования нелинейных методов управления. Одним из них является метод скоростного градиента [2], гарантирующий изменение управляющего воздействия пропорционально градиенту скорости изменения функционала, задающего цель управления.

Чтобы воспользоваться этим методом, для объекта управления, представленного в виде:

$$\dot{x} = F(x,u)$$

где $\boldsymbol{x}$ – вектор переменных состояния объекта управления; $\mathbf{u}$ – вектор управляющих воздействий, необходимо записать цели управления в виде локального целевого функционала:

$$Q = 0.5[y - y^*]^T H[y - y^*]$$

где $\boldsymbol{y}$ и $\boldsymbol{y}^*$ – вектор-функция управляемых величин и их желаемых траекторий соответственно; H – матрица весовых коэффициентов.

Для построения алгоритма управления необходимо вычислить скалярную функцию Ω, представляющую собой скорость изменения функционала Q в силу уравнений объекта управления:

$$\Omega = \frac{\partial Q}{\partial t} + [\nabla_{\mathbf{x}} Q]^T F(x,u),$$

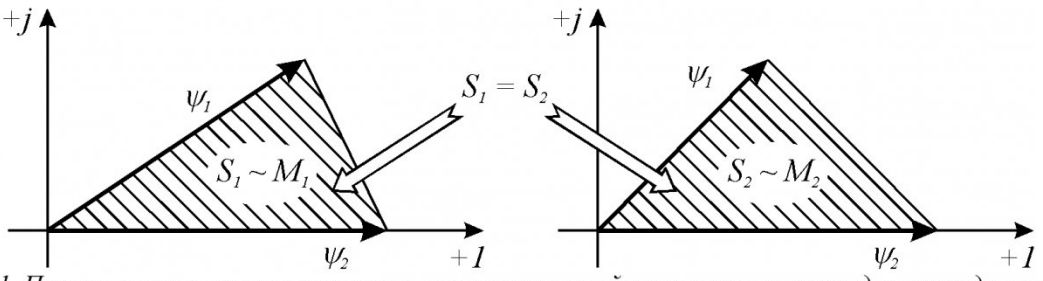

Рис. 1. Пример различного расположения магнитных полей статора и ротора, дающих одинаковый электромагнитный момент

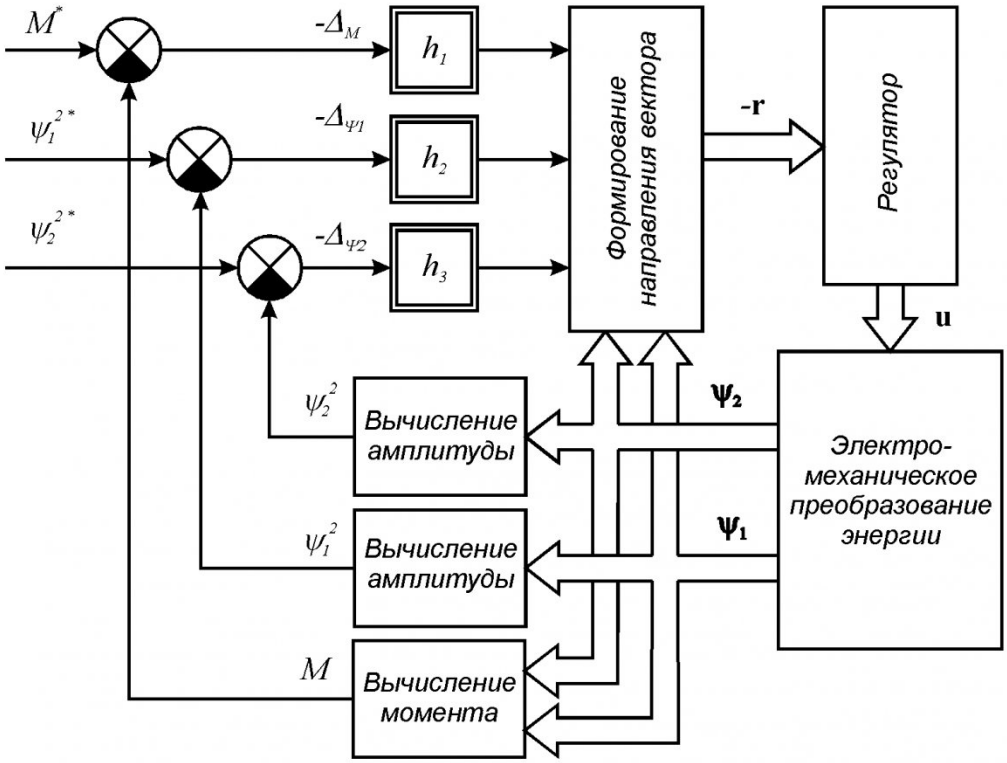

Рис. 2. Структура системы управления

зная которую алгоритм изменения управляющего воздействия можно определить как:

$$\frac{du}{dt} = -\Gamma \nabla_{\mathbf{u}} \Omega,$$

где Γ – матрица усиления.

Результатом применения метода скоростного градиента для обобщенной электрической машины (1), выступающей в качестве модели процесса электромеханического преобразования энергии, и целей управления (2) является обобщенный алгоритм, работу которого естественно называть градиентным управлением:

$$\dot{u} = -r, \qquad (3)$$

где r – вектор-функция переменных состояния:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_{1u} \\ u_{1v} \\ u_{2u} \\ u_{2v} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} -h_1\psi_{2v}\Delta_M + h_2\psi_{1u}\Delta_{\Psi 1} \\ h_1\psi_{2u}\Delta_M + h_2\psi_{1v}\Delta_{\Psi 1} \\ h_1\psi_{1v}\Delta_M + h_3\psi_{2u}\Delta_{\Psi 2} \\ -h_1\psi_{1u}\Delta_M + h_3\psi_{2v}\Delta_{\Psi 2} \end{bmatrix};$$

$$\Delta_M = M - M^*; \; \Delta_{\Psi 1} = \psi_1^2 - \left(\psi_1^2\right)^*;$$

$$\Delta_{\Psi 2} = \psi_2^2 - \left(\psi_2^2\right)^*;$$

h_1, h_2, h_3 – настроечные коэффициенты, определяющие вес каждой из целей (2).

Фактически полученный алгоритм представляет собой математические зависимости, определяющие в каком направлении должен изменяться вектор управляющих воздействий.

В простейшем случае реализовать заданное направление вектора **u** можно с использованием интегрального закона регулирования, однако метод скоростного градиента предоставляет более широкие возможности для управления электромеханическими преобразователями. Его форма записи может конкретизироваться не только в интегральном виде, но и трансформироваться в форму линейной или знаковой зависимости [2], представляя собой пропорциональный или релейный регулятор.

Очевидно также, что не исключены различные комбинации способов задания направления для вектора управляющих воздействий, применение которых будет определять динамику процесса электромеханического преобразования энергии, управляемого по закону (3).

Анализируя полученный алгоритм градиентного управления, следует обратить особое внимание на то, что при его синтезе использовалась математическая модель обобщенной электрической машины, рассматриваемая в произвольно вращающейся системе координат, однако как составляющий элемент в уравнении (3) угловая скорость системы координат ω_k отсутствует.

Это позволяет сделать вывод, что алгоритм управления (3) инвариантен относительно выбранной системы координат и может без измене-

ний использоваться при необходимости координатных преобразований. В силу этих особенностей обобщенная форма алгоритма градиентного управления в ряде случаев может по смыслу совпадать с известными законами управления электродвигателями.

Чтобы наглядно продемонстрировать структуру градиентного управления на рис. 2 приведена блок-схема, отражающая взаимодействие между его отдельными составляющими.

Она подчеркивает, что для реализации алгоритма управления достаточно информации о векторах потокосцепления статора и ротора электродвигателя $\boldsymbol{\psi}_1$ и $\boldsymbol{\psi}_2$, независимо от того, относительно какой системы координат рассматривается электродвигатель как электромеханический преобразователь энергии. Также на этой блок-схеме разделены элементы, обеспечивающие формирование направления вектора управляющих воздействий **u** и его реализацию с помощью регулятора, поскольку направление вектора **u** определяется аналитически исходя из заложенных целей управления, а задача выбора регулятора для его реализации должна решаться исходя из требований, предъявляемых к качеству переходных процессов в электроприводе.

Отдельной задачей, не имеющей однозначного решения, является выбор значений настроечных коэффициентов h_1, h_2 и h_3. При их определении необходимо либо проводить анализ динамики работы электропривода и аналитически выводить значения настроечных коэффициентов в зависимости от его параметров, либо адаптировать алгоритм (3) к текущему состоянию, в случае чего настроечные коэффициенты будут зависеть от потокосцеплений двигателя. Таким образом, в общем случае настроечные коэффициенты не являются константами, что графически выделено на рис. 2.

Несмотря на перечисленные особенности, важно отметить, что обобщенную форму алгоритма (3) можно использовать для управления электрическими двигателями любого типа.

Для этого достаточно применить приемы, справедливые для перехода от обобщенной электрической машины к математическому описанию конкретных типов двигателей.

При этом, однако, становится очевидным, что решение задачи в полном соответствии с изначально поставленными целями возможно лишь для тех типов электрических машин, в которых конструктивно предусмотрены каналы воздействия не менее чем на три составляющие вектора **u**, поскольку в противном случае система становится лишь частично управляемой.

Этому требованию в полной мере отвечают синхронные электродвигатели и машины двойного питания.

Частные случаи градиентного управления электроприводом

Перенесем разработанный обобщенный алгоритм (3) для управления электроприводами с наиболее распространенными в промышленности типами двигателей: синхронным явнополюсной конструкции (СД), асинхронным с короткозамкнутым ротором (АД) и постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ).

Для получения алгоритма управления СД целесообразно производить переход от обобщенных уравнений к частным решениям с использованием системы координат d-q, жестко связанной с положением ротора двигателя, ось d которой расположена вдоль обмотки возбуждения. В этой системе координат вектор управляющих воздействий примет вид:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_{1d} & u_{1q} & u_{в} & 0 \end{bmatrix}^T,$$

где $u_{в}$ – напряжение возбуждения двигателя.

С учетом конструкции двигателя, в указанных условиях составляющая потокосцепления ротора ψ_{2d} равняется потокосцеплению возбуждения $\psi_{в}$, а ψ_{2q}=0.

Тогда математическая зависимость (3) в случае выбора интегрального регулятора трансформируется в выражение:

$$\begin{aligned} u_{1d} &= -\int h_2 \psi_{1d} \Delta_{\Psi 1} dt; \\ u_{1q} &= -\int \left(h_1 \psi_{в} \Delta_M + h_2 \psi_{1q} \Delta_{\Psi 1} \right) dt; \\ u_{в} &= -\int \left(h_1 \psi_{1q} \Delta_M + h_3 \psi_{в} \Delta_{\Psi 2} \right) dt, \end{aligned} \qquad (4)$$

использование которого для управления СД в полной мере обеспечивает достижение всех изначально поставленных целей управления.

Анализируя полученную модификацию алгоритма градиентного управления можно отметить, что для ее применения требуется дополнить систему управления электропривода на базе СД элементом, обеспечивающим реализацию управляющих воздействий в выбранной системе координат, поскольку физически для электродвигателя управляющее воздействие реализуется в виде подводимого напряжения в неподвижной системе координат.

В качестве такого элемента может выступать блок координатных преобразований различной природы. Данный факт позволяет, как частный случай, использовать (4) для управления вентильным двигателем.

В отличие от СД, при получении на базе разработанного обобщенного алгоритма частного решения для управления АД, двигатель удобно рассматривать в неподвижной системе координат α-β, в которой вектор управляющих воздействий запишется как:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_{1\alpha} & u_{1\beta} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T.$$

С учетом приведенного вектора **u** математическая зависимость (3) трансформируется в выражение:

$$u_{1\alpha} = -\int \left(-h_1 \psi_{2\beta} \Delta_M + h_2 \psi_{1\alpha} \Delta_{\Psi 1} \right) dt;$$

$$u_{1\beta} = -\int \left(h_1 \psi_{2\alpha} \Delta_M + h_2 \psi_{1\beta} \Delta_{\Psi 1} \right) dt.$$

Можно отметить, в полученном выражении отсутствует возможность формировать амплитуду вектора потокосцепления ротора. Это объясняется частичной управляемостью асинхронного двигателя относительно изначально поставленных целей управления.

Несмотря на формальное несоответствие поставленным задачам электропривода, анализ динамических свойств модификации алгоритма градиентного управления для АД, изложенный в [3, 4], свидетельствует, что по основным показателям он не уступает широко известному полеориентированному управлению и, следовательно, данная модификация алгоритма полностью применима для управления электроприводом на базе АД.

В случае управления ДПТ, недостаточное число ненулевых составляющих вектора управляющих воздействий:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} 0 & u_в & u_я & 0 \end{bmatrix}^T,$$

где $u_я$ – напряжение якоря двигателя, так же, как и в случае с АД, не позволит реализовать все поставленные цели управления. Однако в отличие от АД вектор **u** ДПТ воздействует как на статор, так и на ротор двигателя.

Учитывая конструктивное исполнение ДПТ, вследствие которого составляющая потокосцепления статора $\psi_{1\alpha}$=0, а $\psi_{1\beta}$ равняется потокосцеплению возбуждения $\psi_в$, цели управления становятся взаимосвязанными.

С учетом этого, чтобы добиться реализуемого управления целесообразно пренебречь целью управления $\psi_2^2 = (\psi_2^2)^*$.

При описанных условиях, выбирая интегральный регулятор, математическая зависимость (3) преобразуется в модификацию алгоритма градиентного управления для ДПТ:

$$u_в = -\int \left(h_1 L_я i_я \Delta_M + h_2 \psi_в \Delta_{\Psi 1} \right) dt;$$

$$u_я = -\int h_2 \psi_в \Delta_M \, dt,$$

где $L_я$ – индуктивность якоря двигателя; $i_я$ – ток якоря двигателя.

Приведенные частные решения подтверждают возможность создания систем управления для регулирования координат электроприводов, построенных на базе конкретных типов электрических машин, с использованием обобщенного алгоритма градиентного управления.

Выводы

Применимость алгоритма градиентного управления для электроприводов, построенных на базе различных типов двигателей, является свидетельством того, что многообразие законов управления электроприводом представляет собой результат рассмотрения с различных позиций одного и того же процесса электромеханического преобразования энергии, имеющего единую физическую природу.

Рассматривая вопрос с данной позиции, полученный обобщенный алгоритм градиентного управления может служить принципиальной основой для создания универсального управляющего устройства, в равной степени пригодного для управления электроприводами на базе различных типов двигателей.

Таким образом, метод скоростного градиента является действенным инструментом для обобщения подходов к управлению электроприводом и позволяет эффективно решать его основные задачи.

СПИСОК ЛИТЕАТУРЫ

1. *Ключев, В. И.* Теория электропривода: учеб. для вузов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.

2. *Фрадков, А. Л.* Кибернетическая физика: принципы и примеры. – СПб.: Наука, 2003. – 208 с.

3. *Завьялов, В. М.* Градиентное управление частотно-регулируемым асинхронным электроприводом // Изв. вузов. Электромеханика. – 2008. – № 3. – С. 71-72.

4. *Семыкина, И. Ю.* Снижение динамических нагрузок в электроприводах карьерных экскаваторов: Диссертация на соискание учен. степени канд. техн. наук. – Кемерово, 2007.

Автор статьи:

Семыкина
Ирина Юрьевна
- канд.т.ехн.наук., доц. каф. электропривода и автоматизации
КузГТУ.
Тел. 8-3842-39-63-54,
e-mail: siyu.eav@kuzstu.ru