

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 62-83:005.22

И.Ю. Семыкина, С.Г. Нехлебова

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МАШИНОЙ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ С ОПТИМИЗАЦИЕЙ ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ КРИТЕРИЯМ

Введение

В современной промышленности широко используется автоматизация технологических процессов, где в качестве исполнительного устройства наибольшее распространение получил электропривод переменного тока, который обладает бесспорными преимуществами в надежности и себестоимости. В таких электроприводах для управления двигателем наиболее часто применяют преобразователи частоты с автономными инверторами напряжения, позволяющие как регулировать координаты, так и оптимизировать режимы работы.

Преобразователи частоты могут реализовывать различные законы управления двигателем, в том числе многокритериальные, позволяющие при правильной настройке добиваться одновременно высокого качества регулирования координат и достижения высоких показателей по дополнительным критериям, например энергетическим. Для создания требуемого многокритериального закона управления необходимо использовать какой-либо нелинейный метод теории автоматического управления, например метод скоростного градиента [1], зарекомендовавший себя в задачах управления электроприводом [2-5].

В качестве объекта управления для данной задачи целесообразно использовать машину двойного питания, поскольку существуют апробированные методики перехода от модели машины двойного питания к моделям различных типов двигателей переменного тока.

Вывод закона управления

Согласно [1], процедура синтеза закона управления начинается с представления математического описания объекта управления в пространстве состояний, выполнив которое получим следующую модель машины двойного питания:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Psi}_{1\alpha} \\ \dot{\Psi}_{1\beta} \\ \dot{\Psi}_{2\alpha} \\ \dot{\Psi}_{2\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_1L_2\sigma & 0 & R_1L_m\sigma & 0 \\ 0 & -R_1L_2\sigma & 0 & R_1L_m\sigma \\ R_2L_m\sigma & 0 & -R_2L_1\sigma & -\omega p \\ 0 & R_2L_m\sigma & \omega p & -R_2L_1\sigma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{1\alpha} \\ U_{1\beta} \\ U_{2\alpha} \\ U_{2\beta} \end{bmatrix}$$

где $\Psi_{1\alpha}$, $\Psi_{1\beta}$, $\Psi_{2\alpha}$, $\Psi_{2\beta}$ – составляющие векторов потокосцепления статора и ротора в неподвижной системе координат $\alpha\beta$; $U_{1\alpha}$, $U_{1\beta}$, $U_{2\alpha}$, $U_{2\beta}$ – составляющие векторов напряжения, подводимого к ста-

тору и ротору; ω – угловая скорость двигателя; p – число пар полюсов; R_1 , R_2 , L_1 , L_2 – сопротивления и индуктивности обмоток статора и ротора; L_m – взаимная индуктивность; $\sigma = 1/(L_1L_2 - L_m^2)$.

Цель управления зададим в виде набора предельных соотношений, при этом основной (технологической) целью управления выберем поддержание на заданном уровне электромагнитного момента двигателя. Также зададим дополнительные цели управления, позволяющие добиться оптимизации режима работы по энергетическому критерию, а именно регулирование амплитуд векторов потокосцеплений статора и ротора, задание угла между ними и минимизация омических потерь:

- 1) $\lim_{t \rightarrow \infty} M(t) = M_{зад}$;
- 2) $\lim_{t \rightarrow \infty} \Psi_1^2(t) = \Psi_{1зад}^2$;
- 3) $\lim_{t \rightarrow \infty} \Psi_2^2(t) = \Psi_{2зад}^2$;
- 4) $\lim_{t \rightarrow \infty} \cos \gamma(t) = \cos \gamma_{зад}$;
- 5) $\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta P(t) = 0$,

где M , $M_{зад}$ – текущий и заданный электромагнитный момент; Ψ_1 , $\Psi_{1зад}$ – текущая и заданная амплитуда вектора потокосцепления статора; Ψ_2 , $\Psi_{2зад}$ – текущая и заданная амплитуда вектора потокосцепления ротора; γ , $\gamma_{зад}$ – текущий и заданный угол между потокосцеплением статора и ротора; ΔP – величина омических потерь.

Для дальнейшей работы с целями управления, их следует выразить через переменные состояния. С учетом этого первые три цели запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} 1) p\sigma L_m (\Psi_{1\beta}\Psi_{2\alpha} - \Psi_{2\beta}\Psi_{1\alpha}) - M_{зад} &= 0; \\ 2) \Psi_{1\alpha}^2 + \Psi_{1\beta}^2 - \Psi_{1зад}^2 &= 0; \\ 3) \Psi_{2\alpha}^2 + \Psi_{2\beta}^2 - \Psi_{2зад}^2 &= 0. \end{aligned}$$

Для выражения четвертой цели управления перейдем от системы координат $\alpha\beta$ к системе координат $u-v$ неподвижной относительно вектора потокосцепления статора, которая показана на рис. 1.

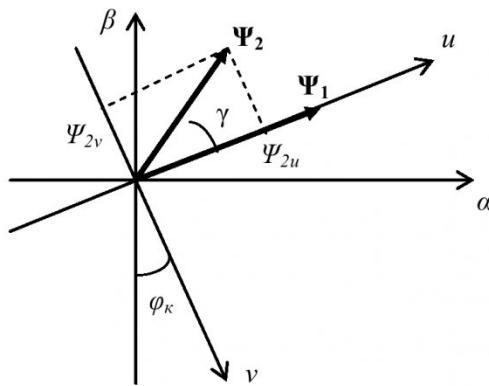


Рис. 1. Потокосцепления статора и ротора в системе координат u - v

Угол между системами координат α - β и u - v определяется выражением:

$$\varphi_k = \arctg \frac{\Psi_{1\beta}}{\Psi_{1\alpha}},$$

тогда с учетом координатных преобразований проекции вектора потокосцепления ротора в системе координат u - v равны:

$$\Psi_{2u} = \Psi_{2\alpha} \frac{\Psi_{1\alpha}}{\Psi_1} + \Psi_{2\beta} \frac{\Psi_{1\beta}}{\Psi_1};$$

$$\Psi_{2v} = -\Psi_{2\alpha} \frac{\Psi_{1\beta}}{\Psi_1} + \Psi_{2\beta} \frac{\Psi_{1\alpha}}{\Psi_1}.$$

Исходя из этих проекций, косинус угла между потокосцеплениями статора и ротора определяется по формуле:

$$\cos \gamma = \frac{\Psi_{2\alpha}\Psi_{1\alpha} + \Psi_{2\beta}\Psi_{1\beta}}{\Psi_1\Psi_2},$$

что определяет запись четвертой цели управления:

$$4)\Psi_{2\alpha}\Psi_{1\alpha} + \Psi_{2\beta}\Psi_{1\beta} - \cos \gamma_{3ad} \cdot \Psi_{13ad}\Psi_{23ad} = 0$$

Для вывода пятой цели управления воспользуемся уравнением, описывающим омические потери:

$$\Delta P = (I_{1\alpha}^2 + I_{1\beta}^2)R_1 + (I_{2\alpha}^2 + I_{2\beta}^2)R_2,$$

где $I_{1\alpha}$, $I_{1\beta}$, $I_{2\alpha}$, $I_{2\beta}$ – составляющие векторов тока статора и ротора.

Выразив данное уравнение через переменные состояния, получим искомую цель управления:

$$5) \quad \begin{aligned} & \left((\Psi_{1\alpha}L_2\sigma - \Psi_{2\alpha}L_m\sigma)^2 + \right. \\ & \left. + (\Psi_{1\beta}L_2\sigma - \Psi_{2\beta}L_m\sigma)^2 \right) \cdot R_1 + \\ & + \left((\Psi_{2\alpha}L_1\sigma - \Psi_{1\alpha}L_m\sigma)^2 + \right. \\ & \left. + (\Psi_{2\beta}L_1\sigma - \Psi_{1\beta}L_m\sigma)^2 \right) \cdot R_2 = 0. \end{aligned}$$

Определив для приведенных целей 1) – 5) скорость изменения локального целевого функционала, найдем такое изменение векторов напряжения, подводимого к статору и ротору, реализация которого автономным инвертором напряже-

ния обеспечит движение объекта управления в пространстве состояний к достижению целей управления. Таким образом, искомый многокритериальный закон управления задается следующими выражениями:

$$\frac{dU_{1\alpha}}{dt} = -\delta_1 \left(\begin{array}{l} h_1 p \sigma L_m (-\Psi_{2\beta})(M - M_{3ad}) + \\ + 2h_2 \Psi_{1\alpha} (\Psi_1^2 - \Psi_{13ad}^2) + h_4 \Psi_{2\alpha} \times \\ \times (\Psi_{2\alpha}\Psi_{1\alpha} + \Psi_{2\beta}\Psi_{1\beta} - \\ - \cos \gamma_{3ad} \Psi_{13ad}) + 2h_5 \sigma \times \\ \times \Delta P (I_{1\alpha}L_2R_1 - I_{2\alpha}L_mR_2) \end{array} \right);$$

$$\frac{dU_{1\beta}}{dt} = -\delta_2 \left(\begin{array}{l} h_1 p \sigma L_m \Psi_{2\alpha} (M - M_{3ad}) + \\ + 2h_2 \Psi_{1\beta} (\Psi_1^2 - \Psi_{13ad}^2) + \\ + h_4 \Psi_{2\beta} (\Psi_{2\alpha}\Psi_{1\alpha} + \Psi_{2\beta}\Psi_{1\beta} - \\ - \cos \gamma_{3ad} \cdot \Psi_{13ad}) + \\ + 2h_5 \sigma \cdot \Delta P (I_{1\beta}L_2R_1 - I_{2\beta}L_mR_2) \end{array} \right)$$

$$\frac{dU_{2\alpha}}{dt} = -\delta_3 \left(\begin{array}{l} h_1 p \sigma L_m \Psi_{1\beta} (M - M_{3ad}) + \\ + 2h_3 \Psi_{2\alpha} (\Psi_2^2 - \Psi_{23ad}^2) + \\ + h_4 \Psi_{1\alpha} (\Psi_{2\alpha}\Psi_{1\alpha} + \Psi_{2\beta}\Psi_{1\beta} - \\ - \cos \gamma_{3ad} \cdot \Psi_{13ad}) + \\ + 2h_5 \sigma \cdot \Delta P (I_{2\alpha}L_1R_2 - I_{1\alpha}L_mR_1) \end{array} \right)$$

$$\frac{dU_{2\beta}}{dt} = -\delta_4 \left(\begin{array}{l} h_1 p \sigma L_m (-\Psi_{1\alpha})(M - M_{3ad}) + \\ + 2h_3 \Psi_{2\beta} (\Psi_2^2 - \Psi_{23ad}^2) + \\ + h_4 \Psi_{1\beta} (\Psi_{2\alpha}\Psi_{1\alpha} + \Psi_{2\beta}\Psi_{1\beta} - \\ - \cos \gamma_{3ad} \cdot \Psi_{13ad}) + \\ + 2h_5 \sigma \cdot \Delta P (I_{2\beta}L_1R_2 - I_{1\beta}L_mR_1) \end{array} \right)$$

где δ_1 , δ_2 , δ_3 , δ_4 – коэффициенты усиления, определяющиеся исходя из максимально допустимого значения напряжения; h_1 , h_2 , h_3 , h_4 , h_5 – весовые коэффициенты, определяющие значимость каждой из целей управления.

Приведенные выражения описывают, каким образом должна изменяться производная составляющих напряжения, подводимого к статору и ротору. Следовательно, разработанный закон управления может быть реализован автономным инвертором напряжения, если результат вычисления правых частей закона подвергнуть преобразованию с использованием интегрального регулятора. Однако помимо интегрального регулятора возможны другие реализации. Так, использование для преобразования пропорционально-интегрального или знакового регуляторов также позволяет достигнуть целей управления.

Разработанный многокритериальный закон управления по определению избыточен. Например, при конкретных заданных M_{3ad} , Ψ_{13ad} и Ψ_{23ad} двигатель может занять только одно состояние с

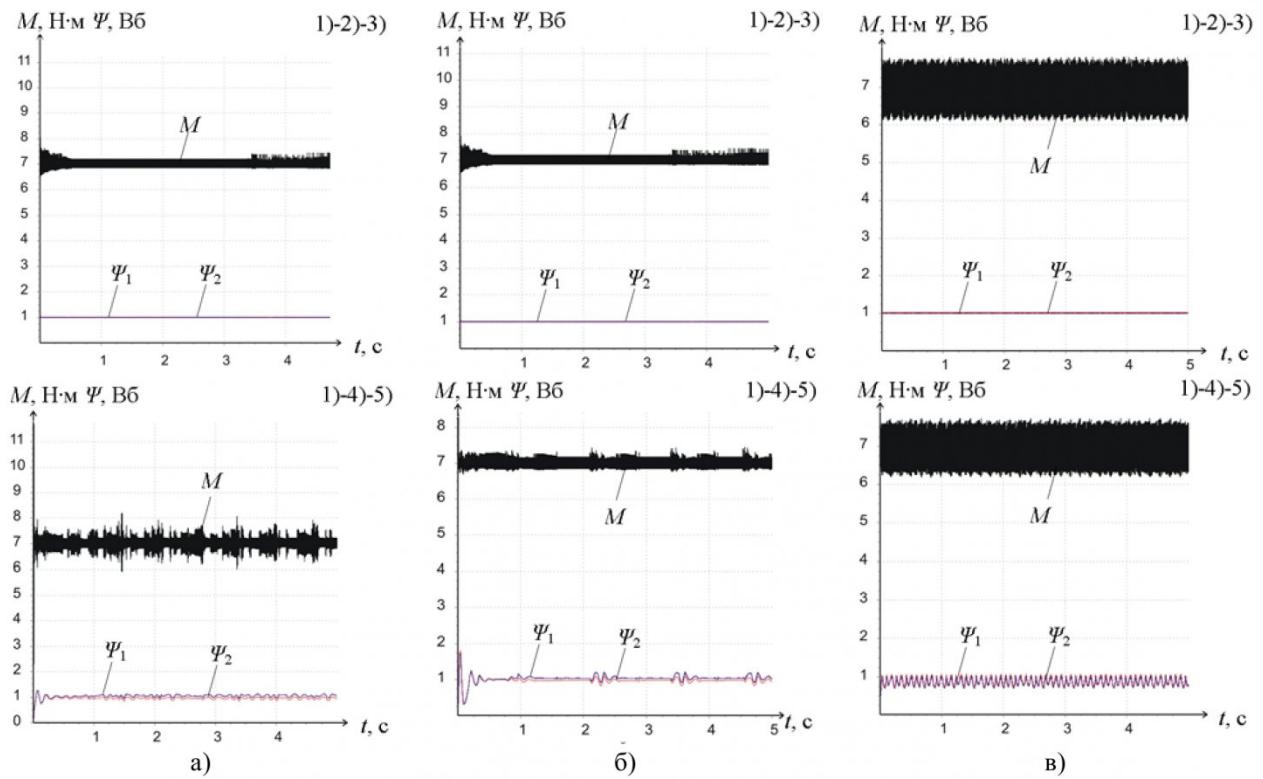


Рис. 2. Переходные процессы: а) И регулятор; б) ПИ регулятор; в) З регулятор

соответствующим ему γ . Поскольку для различных типов двигателей цели управления, обеспечивающие оптимизацию по энергетическому критерию, удобно задавать в различных формах, чтобы многокритериальное управление было результативным, достаточно реализовывать три цели управления: обязательно технологическую и еще две на выбор.

Вычислительные эксперименты

Экспериментальное исследование разработанного многокритериального закона управления выполнено с использованием компьютерной модели, в которой в качестве объекта управления выступает машина двойного питания, у которой напряжение питания формируется либо с помощью широтно-импульсной модуляции при использовании линейных регуляторов, либо за счет непосредственного управления ключами инвертора при использовании знакового регулятора. Компьютерная модель реализована в среде программирования *Delfi*. Моделирование производилось

для двигателя марки 4A80A4У3, мощность которого составляет 1,1 кВт.

В вычислительных экспериментах для преобразования правых частей закона управления применялись регуляторы следующих типов: интегральный (И), пропорционально-интегральный (ПИ) и знаковый (З).

Указанные регуляторы исследовались при всех возможных комбинациях заданий целей управления. Исходя из условия, что исходные значения напряжения за один шаг расчета не превышало максимального значения, был определен допустимый диапазон весовых коэффициентов, представленный в табл. 1.

Для оценки качества регулирования сравнивались переходные процессы, протекающие при ступенчатом приложении задания. В качестве заданных значений при моделировании выбраны $M_{зад}=7$ Н·м, $\Psi_{1зад}=1$ Вб, $\Psi_{2зад}=1$ Вб, а величина угла $\gamma_{зад}$ определялась таким образом, чтобы амплитуды векторов потокосцепления статора и ро-

Таблица 1. Значение весовых коэффициентов при различных комбинациях целей управления

Цели	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5
1)-2)-3)	100000	1000000	1000000	—	—
1)-2)-4)	100000	100000	—	10000	—
1)-2)-5)	100000	100000	—	—	0,01
1)-3)-4)	100000	—	100000	10000	—

Таблица 2. Ошибки регулирования электромагнитного момента

Цели	1)-2)-3)	1)-2)-4)	1)-2)-5)	1)-3)-4)	1)-3)-5)	1)-4)-5)
Регулятор	Статическая ошибка, %					
И	0,28	0,51	0,61	0,76	0,8	0,98
ПИ	2,26	0,92	1,69	1,22	0,8	1,98
З	0,53	0,63	0,49	0,52	0,52	0,53
Регулятор	Максимальная динамическая ошибка, %					
И	248	90	88	86	85	67
ПИ	60	32	31	27	26	20
З	27	13	13	13,3	12	11,8

Таблица 3. Ошибки регулирования потокосцепления статора

Цели	1)-2)-3)	1)-2)-4)	1)-2)-5)	1)-3)-4)	1)-3)-5)	1)-4)-5)
Регулятор	Статическая ошибка, %					
И	0,0035	0,016	0,035	1,38	14,2	4,3
ПИ	0,018	0,098	0,52	2,7	15	6,1
З	0,144	0,39	0,7	1,13	4,5	13,3
Регулятор	Максимальная динамическая ошибка, %					
И	30	25	22,7	15,5	17,4	27,5
ПИ	17	20,7	19	9	21	75
З	7	1,9	2,26	5,7	12,5	29,7

Таблица 4. Ошибки регулирования потокосцепления ротора

Цели	1)-2)-3)	1)-2)-4)	1)-2)-5)	1)-3)-4)	1)-3)-5)	1)-4)-5)
Регулятор	Статическая ошибка, %					
И	0,0036	1,23	6,3	0,044	0,008	7,2
ПИ	0,0037	1,39	4,8	0,1	0,042	5,2
З	0,018	3	4	0,12	0,16	12
Регулятор	Максимальная динамическая ошибка, %					
И	37	8	10,4	28	26	27
ПИ	11	13,3	13,5	20	18,8	77
З	0,86	10	15,4	1,97	1,45	29,9

тора при работе системы управления в отсутствии целей 1) или 2) стремилась к указанным выше значениям.

Для примера, на рис. 2 приведены результаты моделирования для сочетания целей 1)-2)-3) и 1)-4)-5).

Количественная оценка в каждом вычислительном эксперименте проводилась измерением статической и динамической точности регулирования электромагнитного момента, потокосцеплений ротора и статора. Сравнительные показатели качества регулирования представлены в табл. 2 – 4.

Оценивая по табл. 2 качество регулирования

электромагнитного момента можно сделать заключение, что для большинства видов регуляторов и комбинаций целей управления достигается высокая статическая точность, а ошибка регулирования в основном менее одного процента.

Исключением являются результаты при использовании ПИ регулятора, где статическая ошибка составляет около двух процентов. В динамике наибольшее отклонение наблюдается в начале пуска в течение первых 0,04 секунд переходного процесса. При этом максимальное отклонение от заданного значения наблюдается при использовании интегрального регулятора, особенно задавая

Таблица 5. Энергия электрических потерь, Вт

Регулятор	1)-2)-3)	1)-2)-4)	1)-2)-5)	1)-3)-4)	1)-3)-5)	1)-4)-5)
И	510	554	1280	570	1390	1091
ПИ	496	545	784	556	840	896
З	490	577	785	547	655	733

цели управления 2) и 3). Наилучшие результаты показывает использование знакового регулятора.

При анализе статической точности регулирования потокосцепления статора и ротора изначально можно предположить, что наилучший результат будет наблюдаться в том случае, если в комбинации целей управления присутствует 2) или 3) соответственно. Данное предположение полностью согласуется с результатами, представленными в табл. 3 и 4.

Что касается динамической точности, так же как и при регулировании электромагнитного момента, лучшие результаты показывает использование З регулятора.

Учитывая, что при синтезе закона регулирования ставилась задача обеспечения оптимизации по энергетическим критериям, помимо качества регулирования целесообразно оценить электрические потери, характерные для каждого из видов регуляторов и комбинаций целей управления. Для этого во всех описанных выше опытах за фиксированное время, выбранное равным 2,5 с, рассчитывалась энергия электрических потерь. Результаты расчета приведены в табл. 5.

Учитывая, что при вычислительных экспериментах выбирались такие условия, чтобы электромагнитный момент и потокосцепления двигателя стремились к одинаковым значениям во всех опытах, по данным, приведенным в табл. 5, можно заключить, что для разработанного закона управ-

ления наилучшей по энергетическим критериям комбинацией целей управления является 1)-2)-3) при реализации всех типов регуляторов, а использование цели 5), представляющей собой наиболее очевидный путь достижения энергоэффективности, является наименее действенным.

Причиной этого являются различия в характере переходных процессов, обеспечиваемых при разных сочетаниях целей управления. Так, наличие колебательности при использовании цели 5) вызывает дополнительные переходные процессы по токам статора и ротора, вследствие чего увеличивается значение электрических потерь.

Выводы

Результаты вычислительных экспериментов показали работоспособность разработанного многокритериального закона управления машиной двойного питания, а также возможность его оптимизации по энергетическим критериям с использованием в качестве целей управления поддержание на заданном уровне электромагнитного момента двигателя, а также амплитуд векторов потокосцеплений статора и ротора.

При этом наилучшие результаты по совокупности энергетических, статических и динамических показателей качества достигаются при использовании знакового регулятора для реализации преобразователем частоты напряжения, подводимого к статору и ротору.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фрадков, А. Л. Кибернетическая физика: принципы и примеры. – СПб.: Наука, 2003. – 208 с.
2. Завьялов В.М. Многокритериальное управление асинхронным электроприводом / В.М. Завьялов, А.А. Неверов, И.Ю. Семыкина // Вестник КузГТУ. – 2005. – №1 – С.81-84.
3. Стародуб А.В. Реализация системы регулирования угловой скорости асинхронного электродвигателя на основе метода скоростного градиента / А.В. Стародуб, И.Ю. Семыкина // Вестник КузГТУ. – 2005. – №6. – С. 69-72.
4. Семыкина И.Ю. Градиентное управление многодвигательным асинхронным электроприводом / И.Ю. Семыкина, В.М. Завьялов, М.А. Глазко // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 4. – С. 65-69.
5. Семыкина И. Ю. Градиентное управление в решении основных задач электропривода // Вестник КузГТУ. – 2010. – №1 – С. 99-103.

□ Авторы статьи:

Семыкина

Ирина Юрьевна,
канд.техн.наук, доцент каф.
электропривода и автоматизации
КузГТУ.
E-mail: siyu.eav@kuzstu.ru

Нехлебова

Светлана Геннадьевна,
студентка гр. ЭА-061 КузГТУ.
E-mail: ja-cveta@mail.ru