

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.3.07

А.В. Григорьев

ОБЗОР ВАРИАНТОВ ПРЯМОГО УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТОМ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ (ЧАСТЬ 2)

Развитие идеи прямого управления моментом привело к появлению ряда совершенно непохожих по своей реализации методов управления, которые, тем не менее, носят название DTC. Сущность данных вариантов заключается в наискорейшем достижении заданных значений амплитуды вектора потока статора или ротора и электромагнитного момента.

Одним из таких методов управления является Deadbeat DTC [1, 2]. Идея Deadbeat DTC заключается в формировании заданного вектора потока за один период дискретизации в зависимости от заданных значений амплитуды потока и электромагнитного момента (рис. 1). Известно, что через период времени $\Delta t = t_{n+1} - t_n$, равный периоду широтно-импульсной модуляции (ШИМ), момент и поток статора должны принять заданные значения. Исходя из этого, рассчитывают приращения электромагнитного момента и потока статора ΔT , $\Delta \Phi$. Эти значения однозначно указывают на следующее положение вектора потока статора $\vec{\lambda}_s(t_{n+1})$, из которого и определяется заданный вектор напряжения, формируемый при помощи ШИМ.

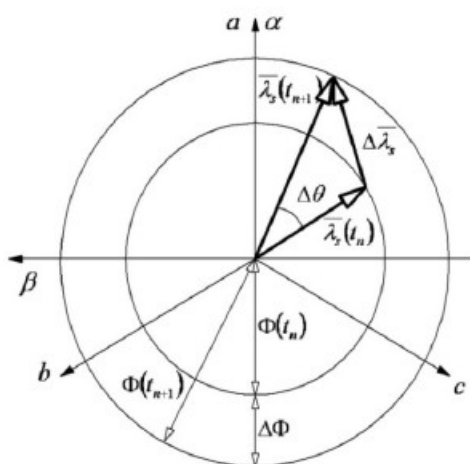


Рис. 1. Векторная диаграмма потоков электродвигателя при реализации метода управления DeadBeat DTC

При таком подходе переменные машины имеют квазисинусоидальный вид, что обеспечива-

ет минимизацию потерь в двигателе и преобразователе.

К недостаткам метода Deadbeat DTC можно отнести:

- значительно возросшую сложность алгоритма управления;
- высокую сложность в определении требуемых координат, в частности, круговой частоты вектора противо-ЭДС обмотки статора и частоты вращения электродвигателя;
- использование ШИМ.

Достоинства метода Deadbeat DTC:

- низкая частота коммутации ключей инвертора;
- минимально-возможный размах колебаний электромагнитного момента и амплитуды вектора потока статора.

Замкнутые методы управления с пропорционально-интегральными регуляторами (ПИ) потока и электромагнитного момента, основанные на модели электродвигателя в системе координат, связанной с вектором потока статора, получили название пространственно-векторное прямое управление моментом (DTC-SVM) [3-5]. Сущность методов DTC-SVM заключается в прямом воздействии вектора напряжения статора, заданное значение которого формируется на выходе ПИ-регуляторов, на электромагнитный момент и амплитуду вектора потока статора. Расчет параметров ПИ-регуляторов DTC-SVM представляет сложную задачу, решение которой предложено в диссертационной работе [5].

К недостаткам метода DTC-SVM следует отнести:

- необходимость координатных преобразований;
- высокую частоту коммутации ключей инвертора;
- использование пространственно-векторной ШИМ;
- скорость изменения электромагнитного момента ниже, чем при реализации методов DSC и DTC;
- сложность настройки регуляторов.

Достоинствами метода DTC-SVM являются:

- минимальный размах колебаний электро-

магнитного момента и амплитуды вектора потока статора в установившемся режиме;

- постоянство частоты коммутации ключей инвертора.

Метод «сглаживания» (dithering) является наиболее простым способом снижения размаха колебаний электромагнитного момента и амплитуды магнитного потока статора [6, 7]. Идея метода заключается в введении сигнала высокочастотной помехи в каналы регулирования электромагнитного момента и магнитного потока статора. В данном случае сигнал помехи помогает снизить размах колебаний (ripple) электромагнитного момента и потока двигателя (рис. 2), так как способствует более ранней реакции системы управления на изменение координат электродвигателя. В работе [6] говорится, что для увеличения частоты коммутации ключей инвертора до 10 кГц сигнал помехи должен иметь частоту около 30 кГц. Амплитуды сигналов помех ($\Delta\psi$, ΔM) устанавливаются на уровне ширины зоны неоднозначности соответствующих компараторов (H_ψ , H_M).

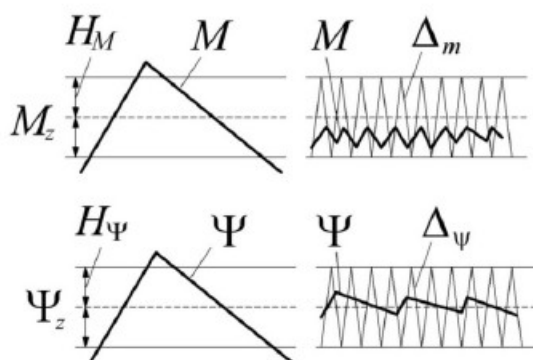


Рис. 2. Влияние помехи на кривые электромагнитного момента и амплитуды вектора потока статора

Достоинства метода «сглаживания»:

- простота реализации;
- отсутствие блока ШИМ.

Недостатки метода «сглаживания»:

- высокая частота коммутации ключей инвертора, а, следовательно, большие динамические потери в ключах и их нагрев;
- среднее значение электромагнитного момента устанавливается на уровне, меньшем заданного.

Методы нечеткой логики вместе с методом DTC (Fuzzy DTC, Fuzzy based DTC) придают хорошие динамические и статические характеристики электроприводу на базе машины переменного тока, позволяя при этом снизить размах колебаний электромагнитного момента и магнитного потока статора. Возможно несколько вариантов применения нечеткой логики при построении систем прямого управления моментом:

- для вычисления скважности импульса напряжения (Fuzzy based DTC) [8];

- для вычисления компонент вектора напряжения (Fuzzy DTC) [9-11].

В первом случае (см. работу [8]) определяют функции принадлежности в пространстве состояний и составляют базу правил, основанную на трех переменных: ошибках регулирования амплитуды потока статора (e_ψ) и электромагнитного момента (e_m), а также угловом положении вектора потока ($\theta = 0 \dots \pi/3$), которое определяется относительно начала одного из 6 секторов, делящих окружность (рис. 3).

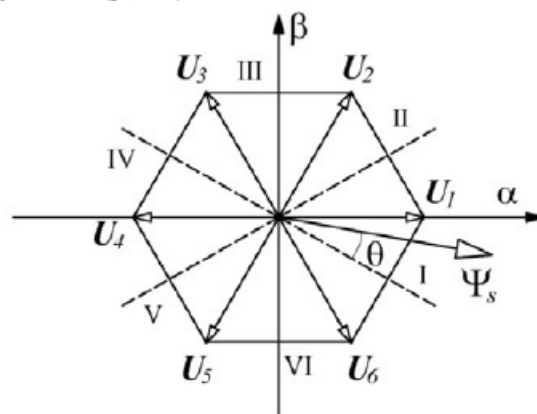


Рис. 3. Векторная диаграмма состояний инвертора

Процесс управления по методу Fuzzy based DTC включает в себя следующие шаги:

1. Фаззификация входных переменных (θ , e_ψ , e_m), т.е. определение принадлежности переменных к нечетким множествам (S, M, L).
2. Соотнесение нечетких значений входных переменных с нечеткими значениями выходной переменной по базе правил.
3. Дефаззификация выходной переменной (скважность импульса вектора напряжения γ), т.е. вычисление численного значения переменной на основе ее нечеткого значения.

Во втором случае (см. [9-11]) таблица переключения, свойственная для классического DTC, не используется и база правил усложняется. Кроме того, выходная переменная (вектор напряжения) принимает дискретные значения, а, значит, функция дефаззификации реализуется следующим образом: если ($\theta = \theta_i$) и ($e_m = A_i$) и ($e_\psi = B_i$), то $U = U_i$. База правил для метода Fuzzy DTC состоит из 180 правил.

К недостаткам метода Fuzzy DTC можно отнести следующее:

- сложность таблицы переключений, включающей большое количество правил;
- нечеткие правила не учитывают влияние частоты вращения и противо-ЭДС статора на изменение электромагнитного момента, вследствие чего будет происходить увеличение размаха колебаний с ростом частоты вращения.

Прямое управление моментом с использованием искусственных нейронных сетей (ANN DTC) обладает наилучшими статическими и динамиче-

скими характеристиками среди методов прямого управления моментом, использующих интеллектуальные технологии [10-11]. Обучение нейронной сети выполняется при помощи рекуррентного соотношения, основанного на ошибке вычисления нейронной сетью вектора весов, до тех пор, пока разница значений выходных переменных нейронной сети и выходных переменных таблицы переключения не станет меньше заданного значения. Реализация методов ANN DTC подразумевает использование известных значений вектора весов, вычисленных в ходе обучения нейронной сети. Нейронный контроллер представляет собой совокупность простейших арифметических операций (сложение и умножение), что делает возможным быструю обработку поступившей информации и быстрое реагирование на изменение переменных и задания. Методы ANN DTC обладают следующими достоинствами: простотой реализации контроллера; робастностью к неточности идентификации переменных; меньшим временем отклика на изменения переменных. Основным недостатком метода ANN DTC является сложность организации обучения нейронной сети при ее адаптации к

конкретному двигателю.

Таким образом, у всех вариантов прямого управления моментом есть достоинства и недостатки, обуславливающие область их применения. Классические варианты прямого управления моментом представляют собой частные случаи систем разрывного управления состоянием электрических машин переменного тока. Данные системы максимально просты и эффективны (под эффективностью понимается быстрдействие системы управления). Однако использование вектора напряжения большой амплитуды в установившемся режиме создает в системах DTC и DSC проблему колебаний электромагнитного момента и амплитуды вектора потока статора. Решением данной проблемы занимается множество исследователей. Предложены варианты, основанные на ШИМ, сглаживании, нечеткой логике и нейронных сетях, позволяющие уменьшить амплитуду пульсаций электромагнитного момента и магнитного потока в установившемся режиме. Главным недостатком усовершенствованных вариантов является усложнение системы управления и, как следствие, уменьшение диапазона устойчивой работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Matic, P.R.* A novel direct torque and flux control algorithm for the induction motor drive/ P.R. Matic, B.D. Blanus, S.N. Vukosavic// IEEE Electric machines and drive conference: proceedings of the International conference. – Madison, 2003. – Vol. 2 - P. 965-970.
2. *Kenny, B.H.* Stator- and rotor-flux-based deadbeat direct torque control of induction machines/ B.H. Kenny, R.D. Lorenz// IEEE Transactions on industry applications. – 2003. – Vol. 39. – No. 4. – P. 1093-1101.
3. *Lascu, C.* Combining the principles of sliding mode, direct torque control, and space-vector modulation in a high-performance sensorless ac drive/ C. Lascu, A.M. Trzynadlowski// IEEE Transactions on industry applications. – 2004. – Vol. 40. – No. 1. – P. 170-177.
4. *Lascu, C.* A modified direct torque control for induction motor sensorless drive/ C. Lascu, F. Blaabjerg// IEEE Transactions on industry applications. – 2000. – Vol. 36. – No. 1. – P. 122-130.
5. *Zelechowski, M.* Space vector modulated – direct torque controlled (DTC-SVM) inverter-fed induction motor drive. Ph. D. Thesis. – Warsaw. – 2005. – 169 p.
6. *Noguchi, T.* Enlarging switching frequency in direct torque-controlled inverter by means of dithering/ T. Noguchi, M. Yamamoto, S. Kondo, I. Takahashi// IEEE Transactions on industry applications. – 1999. – Vol. 35. – No. 6. – P. 1358-1366.
7. *Kazmierkowski, M.P.* Improved direct torque and flux vector control of pwm inverter-fed induction motor drives/ M.P. Kazmierkowski, A.B. Kasprowicz// IEEE Transactions on industrial electronics. – 1995. – Vol. 42. – No. 4. – P. 344-350.
8. *Arias, A.* Fuzzy logic direct torque control/ A. Arias, J.L. Romeral, E. Aldabas, M.G. Jayne// IEEE Industrial electronics: proceedings of the International symposium. – Cholula, Puebla, Mexico, 2000. – Vol. 1 – P. 253-258.
9. *Toufouti, R.* Direct torque control for induction motor using fuzzy logic/ R. Toufouti, S. Meziane, H. Benalla// ACSE Journal. – 2006. – Vol. 6. – Issue. 2. – P. 19-26.
10. *Toufouti, R.* Direct torque control for induction motor using intelligent techniques/ Toufouti, S. Meziane, H. Benalla// Journal of theoretical and applied information technology. – 2007. – P. 35-44.
11. *Vasudevan, M.* High-performance adaptive intelligent direct torque control schemes for induction motor drives/ M. Vasudevan, R. Arumugam// KMITL science technology Journal. – 2005. – Vol. 5. – No. 3. – P. 559-576.

П.Автор статьи

Григорьев
Александр Васильевич,
канд. техн. наук, ст. преп. каф. электро-
привода и автоматизации КузГТУ
E-mail: grigav84@mail.ru.