# 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.

## Метод управления Deadbeat DTC

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.

**Векторная диаграмма потоков приведена на рисунке 1:**



Рисунок 1 – Векторная диаграмма потоков электродвигателя при реализации метода управления DeadBeat DTC

**Известны следующие аспекты управления:**

* Что через период времени Δt = tn+1 - tn, равный периоду широтно-импульсной модуляции (ШИМ).
* При этом момент и поток статора должны принять заданные значения.
* Исходя из этого, рассчитывают приращения электромагнитного момента и потока статора ΔТ, ΔФ.
* Эти значения однозначно указывают на следующее положение вектора потока статора λ̅S(tn+1), из которого и определяется заданный вектор напряжения, формируемый при помощи ШИМ.

При таком подходе переменные машины имеют квазисинусоидальный вид, что обеспечивает 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 при использования ШИМ.

**Достоинства метода Deadbeat DTC:**

* Низкая частота коммутации ключей инвертора.
* Минимально-возможный размах колебаний электромагнитного момента и амплитуды вектора потока статора.

## Метод управления DTC-SVM

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 электромагнитного момента и амплитуды вектора потока статора в установившемся режиме.
* Постоянство частоты коммутации ключей инвертора.

## Метод «сглаживания» - dithering

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, так как способствует более ранней реакции системы управления на изменение координат электродвигателя.

**На рисунке 2 представлены особенности данного метода управления:**



Рисунок 2 – Влияние помехи на кривые электромагнитного момента и амплитуды вектора потока статора

В работе [6] говориться, что для увеличения частоты коммутации ключей инвертора до 10 кГц сигнал помехи должен иметь частоту около 30 кГц.

Амплитуды сигналов помех (ΔΨ, ΔМ) устанавливаются на уровне ширины зоны неоднозначности соответствующих компараторов (НΨ. НМ).

**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 Fuzzy DTC и Fuzzy based DTC

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 смотрите работу [8] определяют функции принадлежности в пространстве состояний и составляют базу правил, основанную на трех переменных:**

* Ошибках регулирования амплитуды потока статора (ɛΨ).
* Электромагнитного момента (ɛm).
* Угловое положение вектора потока (θ = O..π/З).

**Данные параметры определяется относительно начала одного из 6 секторов, делящих окружность, представлены на рисунке 3:**



Рисунок 3 – Векторная диаграмма состояний инвертора

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

* 1 - Фаззификация входных переменных (θ, ɛΨ, ɛm), то есть определение принадлежности переменных к нечетким множествам (S, М, L).
* 2 - Соотнесение нечетких значений входных переменных с нечеткими значениями выходной переменной по базе правил.
* 3 - Дефаззификация выходной переменной (скважность импульса вектора напряжения y), то есть вычисление численного значения переменной на основе ее нечеткого значения.

Во втором случае смотрите публикации [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 дефаззификация реализуется следующим образом:**

* Если (θ=θ1) и (ɛm=Ai) и (ɛΨ=Bi).
* Следовательно, U=Ui.

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.

## Управление моментом с использованием искусственных нейронных сетей ANN DTC

Прямое управление моментом с использованием искусственных нейронных сетей ANN DTC обладает наилучшими статическими н динамическими 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.
* Это происходит 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 с робастностью к неточности идентификации переменных.
* В результате с меньшим временем отклика на изменения переменных.

**Основным недостатком метода ANN DTC является:**

* Сложность организации обучения нейронной сети при ее адаптации к конкретному двигателю.

## Основные выводы по результатам исследований методов управления электродвигателем

**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, где под эффективностью понимается быстродействие 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.

**В итоге в двух статьях рассмотрены следующие методы управления электродвигателем на основании:**

* ШИМ.
* Сглаживание.
* Нечеткой логике.
* Нейронных сетях.

**У данных методов есть свои плюсы и минусы:**

* Предложены варианты управления 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. A novel direct torque and flux control algorithm for the induction motor drive/ P.R. Matic, B.D. Blanusa, S.N. Vukosavic// IEEE Electric machines and drive conference: proceedings of the International conference. - Madison, 2003. - Vol. 2 - P 965-970.
2. Stator- and rotor-flux-based deadbeat direct torque control of induction machines/ B.H. Kenny, Ps.D. Lorenz//IEEE Transactions on industry applications. - 2003 - Vol. 39. - No. 4. - P. 1093-1101.
3. 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. A modified direct torque control for induction motor sensorless drive/ C. Lascu, F. Blaabjerg// IEEE Transactions on industry applications. - 2000. - Vol. 3 6 .- N o . l. - P 122-130.
5. Zelechowsfci, M. Space vector modulated - direct torque controlled (DTC-SVM) inverter-fed induction motor drive Ph. D. Thesis. - Warsaw - 2005. - 169 p.
6. 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 3 5.- No. 6. - P. 1358-1366.
7. Lnproved 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. 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. 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. Direct torque control for induction motor using intelligent techniques/ R. Toufouti, S. Meziane, H. Benalla// Journal of theoretical and applied information technology. - 2007. - P. 35-44.
11. 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.
12. [Обзор вариантов прямого управления моментом асинхронных электродвигателей — часть 1.](https://gekoms.org/2021/11/10/obzor-variantov-prjamogo-upravlenija-momentom-asinhronnyh-jelektrodvigatelej-chast-1/)

Источник: Обзор вариантов прямого управления моментом асинхронных электродвигателей (часть 2) / А.В. Григорьев // Вестник КузГТУ. - 2012. - №3. - C. 136-138.