

УДК 62 – 83: 621.313.3

УЧЕТ НАСЫЩЕНИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ПРОЦЕСС РАЗГОНА

Мазуренко Л.И., д.т.н., проф.

Институт электродинамики НАН Украины

Стаценко А.В., ассистент

Киевский национальный университет технологий и дизайна

01011, г. Киев, ул. Немировича-Данченко, 2

E-mail: stalexey@meta.ua

У даній статті розглянуті питання керування асинхронним двигуном в системі частотно-регульованого електропривода. Показано, що максимум моменту досягається при насиченій магнітній системі двигуна. Запропонований алгоритм керування асинхронним двигуном, що забезпечує максимум моменту та враховує обмеження перетворювача частоти по максимальному струму та напрузі.

Ключові слова: частотно-струмове керування, насичення магнітної системи, врахування обмежень.

In the given paper questions of induction motor control in the variable-frequency electric drive system are examined. It is shown that maximum torque is achieved under motor's magnetic system saturation. Induction motor control algorithm providing maximum torque and considering frequency converter maximum current and voltage limitations is proposed.

Key words: frequency-current control, magnetic system saturation, limitations consideration.

Введение. В современных системах асинхронного электропривода широко используются преобразователи частоты. Учитывая высокую эффективность таких систем, как средств ресурсо- и энерго-сбережения, их развитие является актуальной задачей.

Анализ предыдущих исследований. С учетом того, что в таких электроприводах фактически формируются синусоидальные токи статора, по отношению к двигателю преобразователи частоты могут рассматриваться как источники тока переменной амплитуды и частоты с ограничениями максимальных значений выходного тока и напряжения. Как известно [1], при частотно-токовом управлении, в отличие от управления напряжением, магнитный поток машины может изменяться в широких пределах. Это, в свою очередь, приводит к изменению уровня насыщения магнитопровода асинхронного двигателя. Поэтому при анализе его работы необходимо учитывать реальную характеристику намагничивания. Одним из подходов к учету ее нелинейности является введение в модель двигателя нелинейной индуктивности намагничивания L_M [2]. В зависимости от того, какие переменные входят в модель, используются зависимости L_M от тока намагничивания или потокосцепления намагничивания.

В большинстве систем электропривода работа двигателя ограничена линейным участком этой характеристики. Например, в системах, реализующих управление с ориентацией по вектору потокосцепления (векторное управление) [3], работа на ненасыщенном участке характеристики намагничивания обеспечивается ограничением потоковой состав-

ляющей тока статора. Также это достигается в системах, где используются законы управления, разработанные на основе закона Костенко [4]. В них напряжение цепи намагничивания изменяется пропорционально частоте, и соответственно ток намагничивания практически неизменен.

Следует заметить, что при работе двигателя на ненасыщенном участке характеристики намагничивания и при токе статора, ограниченном на номинальном уровне, электромагнитный момент также будет ограничен приблизительно номинальным значением.

Одновременно с этим это значение электромагнитного момента не является максимально возможным. В [5, 6] показано, что для реализации экстремального управления, т.е. управления, обеспечивающего наилучшие показатели по каким-либо критериям, необходимо учитывать реальную кривую намагничивания. Приведенное в [5] решение сложно реализуемо, поскольку зависит от внутренних переменных асинхронного двигателя, таких как токи и потокосцепления цепи намагничивания.

Цель работы. Задача данных исследований заключается в определении такого алгоритма управления током и частотой, при котором обеспечивался бы максимальный электромагнитный момент и требовались бы только измерения тока, напряжения статора и частоты вращения.

Материал и результаты исследований. Определить зависимость индуктивности контура намагничивания от тока намагничивания можно по характеристике холостого хода $U_{sd} = f(I_{sd})$, где U_{sd} , I_{sd} – действующие значения тока и напряжения статора.

В дальнейшем будем использовать амплитудные значения.

При работе на холостом ходу механическая работа не совершается, ток ротора стремится к нулю, и Т-образная схема замещения имеет вид последовательно соединенных активного сопротивления статора, индуктивного сопротивления рассеяния статора и индуктивного сопротивления контура намагничивания. Исходя из этой схемы, экспериментально можно получить зависимость ЭДС взаимоиндукции от тока намагничивания. Для асинхронного двигателя типа 4А160М4У3 эта зависимость показана на рис. 1.

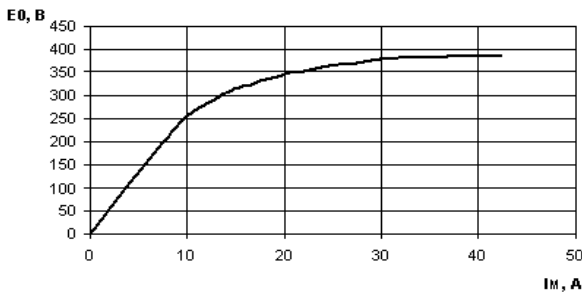


Рисунок 1 – Зависимость ЭДС взаимоиндукции от тока намагничивания

Для использования этой зависимости при моделировании целесообразно её интерполировать аналитической функцией. На нелинейном участке её можно представить в виде экспоненциальной функции вида:

$$E_0 = \omega_s \cdot K \cdot (1 - e^{-\frac{I_M}{a}}),$$

где: ω_s - угловая частота магнитного поля статора (для данного случая 314 рад/с), I_M – амплитуда тока намагничивания, K, a – коэффициенты ($K=1,26, a=9,5$).

Тогда индуктивности намагничивания будем определять следующим образом:

$$L_1 = K \cdot \frac{(1 - e^{-\frac{I_M}{a}})}{I_M}; \quad (1)$$

$$L_M = \begin{cases} L_{M0}, & \text{при } L_1 \geq L_{M0}, \\ L_1, & \text{при } L_1 < L_{M0}. \end{cases}$$

Эти выражения описывают функцию $L_M(I_M)$ на двух участках: на линейном – индуктивность намагничивания постоянна и равна для данного двигателя $L_{M0}=0,088$ Гн (справочное значение); на нелинейном участке – определяется как функция от тока намагничивания. Эта функция показана на рис. 2. Штриховой линией показана граница насыщения, которой соответствует ток намагничивания 8,5 А.

Для определения абсолютного скольжения, обеспечивающего максимум момента, необходимо знать величину тока намагничивания и потокосцепления намагничивания [5]. В связи с тем, что эти величины не могут быть измерены непосредственно, использование такого подхода затруднительно. Получить функцию, зависящую от тока статора, для

конкретного двигателя можно с использованием численных методов.

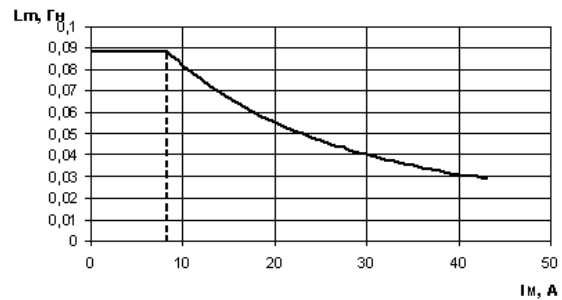


Рисунок 2 – Зависимость индуктивности намагничивания от тока намагничивания

Для этого был использован следующий подход. Для заданных значений амплитуды, частоты тока статора, абсолютного скольжения и неизменной индуктивности намагничивания по схеме замещения рассчитывается ток намагничивания и по (1) определяется индуктивность намагничивания. Если разница между первоначально принятой и рассчитанной индуктивностью превышает заданную величину, то значение индуктивности изменяется и процесс повторяется. Если разница не превышает эту величину, то рассчитывается ток ротора и момент на валу. Выполнив эту операцию для ряда значений абсолютного скольжения, можно определить, при каком абсолютном скольжении электромагнитный момент будет максимален.

На рис. 3 показана зависимость момента от абсолютного скольжения для амплитуды тока статора равной 50 А и скорости вращения двигателя 1500 об/мин. Зависимость была получена для двигателя типа 4А160М4У3 [7] с параметрами $R_s = 0,264$ Ом, $R_r = 0,151$ Ом, $L_s = 1,7$ мГн, $L_r = 2,6$ мГн, $L_M = 88$ мГн, $p = 2$.

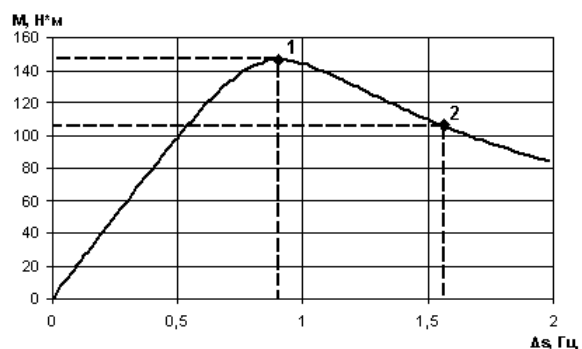


Рисунок 3 – Зависимость электромагнитного момента от абсолютного скольжения

Учитывая то, что электромагнитный момент зависит не от скорости вращения, а от абсолютного скольжения, зависимость, представленная на рис. 3, будет иметь такой же вид и для других скоростей вращения.

Увеличение момента обусловлено следующими причинами. С одной стороны, увеличение потокос-

цепления влияет на величину момента, поскольку он определяется как векторное произведение тока на потокосцепление. Увеличение потокосцепления обусловлено увеличением тока в цепи намагничивания. С другой стороны, изменение самой индуктивности намагничивания приводит к изменению угла между векторами тока и потокосцепления, что отрицательно сказывается на величине момента. Однако суммарное влияние этих двух процессов приводит к тому, что максимум момента достигается при работе на нелинейном участке характеристики намагничивания.

На рис. 4 показана зависимость тока в цепи намагничивания от абсолютного скольжения для случая показанного на рис. 3. Точке максимума момента (точка 1) на ней соответствует ток 22,1 А. Точка 2 соответствует максимальному току намагничивания при ненасыщенной магнитной цепи асинхронного двигателя (8,5 А).

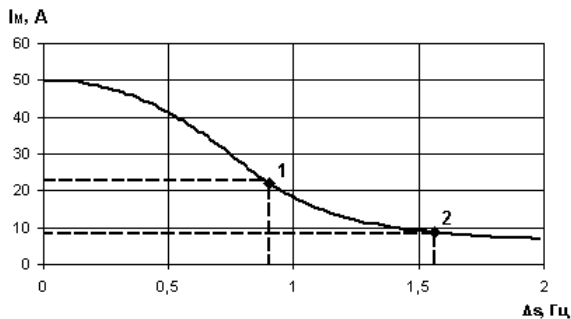


Рисунок 4 – Зависимость тока в цепи намагничивания от абсолютного скольжения

Также необходимо учитывать, что при изменении тока статора должен изменяться ток цепи намагничивания, определяющий степень насыщения электрической машины. Соответственно при малых токах статора насыщение вообще будет отсутствовать.

Рассмотрим, каким образом изменяется функция момента от абсолютного скольжения при изменении тока статора. На рис. 5 показаны графики этих функций для рассматриваемого асинхронного двигателя при четырех значениях тока статора, равных 8, 12, 30 и 50 А. Точками отмечены максимумы момента.

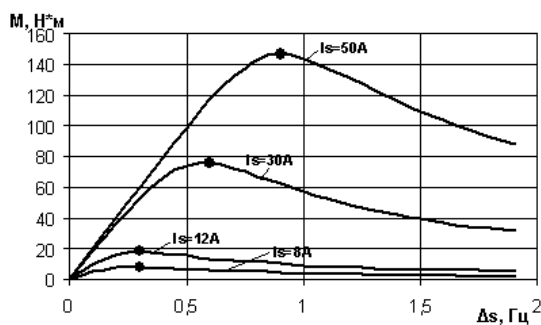


Рисунок 5 – Зависимость электромагнитного момента от абсолютного скольжения при изменении тока статора

Как видно из графиков, при малых значениях токов максимум момента достигается при одном и том же значении абсолютного скольжения, а при больших значениях максимум момента смещается влево.

Действительно, при отсутствии насыщения, что имеет место при малых токах, максимальное значение электромагнитного момента достигается при определенном значении абсолютного скольжения, которое зависит только от параметров асинхронного двигателя [8, 9]. Это абсолютное скольжение определяется по формуле:

$$\Delta s_{\text{опт}} = \frac{R_r}{2 \cdot \pi \cdot (L_r + L_M)} \quad (2)$$

Рассчитаем и построим зависимость оптимального абсолютного скольжения от тока статора (рис. 6 сплошная линия). Для этого определим абсолютное скольжение для максимального момента при различных токах.

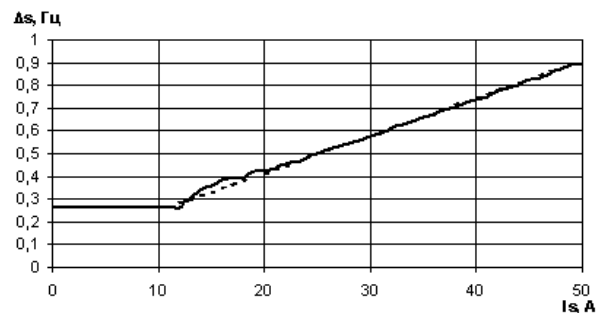


Рисунок 6 – Зависимость оптимального абсолютного скольжения от тока статора

Полученную функцию можно представить суммой двух функций: постоянной, значение которой соответствует оптимальному скольжению при отсутствии насыщения, и кусочно-линейной функцией, с минимальным значением, равным нулю. В данном случае эта функция имеет вид:

$$\begin{aligned} \Delta s(I_s) &= \Delta s_{\text{опт}} + \Delta s_{\text{Нас}}; \\ Y &= b1 \cdot I_s - b2; \\ \Delta s_{\text{Нас}} &= \begin{cases} Y, & \text{при } Y > 0, \\ 0, & \text{при } Y \leq 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

График ее показан на рис. 6 пунктиром.

Следует отметить, что при оптимальном скольжении магнитная система двигателя находится в насыщении. На рис. 7 показан график зависимости тока намагничивания от тока статора при оптимальном скольжении.

Для того чтобы показать эффективность использования такого подхода к управлению, сравним момент, полученный при рассмотренном подходе (рис. 8 сплошная линия), и максимальный момент, получаемый при ограничении тока намагничивания на границе насыщения (пунктирная линия, рис. 8).

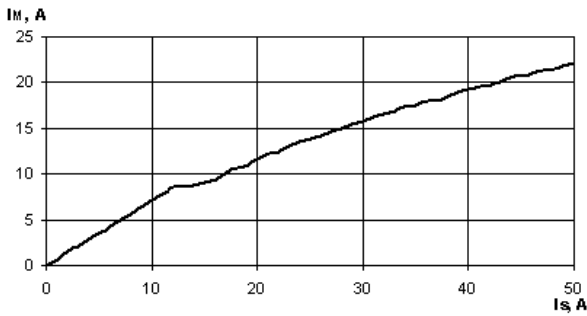


Рисунок 7 – График зависимости тока намагничивания от тока статора при оптимальном скольжении

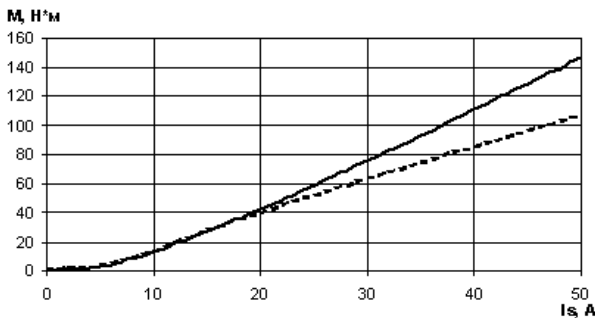


Рисунок 8 – Зависимость момента от тока статора

Как видно из графиков, при малых значениях тока моменты не отличаются, поскольку в обоих случаях работа выполняется при одинаковом абсолютном скольжении, соответствующем оптимальному значению. При дальнейшем увеличении тока момент, получаемый при насыщении магнитной системы, больше, чем момент, получаемый при ограничении тока намагничивания. И при номинальном токе статора разница между ними составляет более трети от момента, получаемого на границе насыщения.

Также следует учитывать, что любой преобразователь частоты, используемый в системах электропривода, имеет ограничения не только по максимальным значениям токов, но и по максимальному напряжению. При токе намагничивания 22 А ЭДС взаимной индукции равно, приблизительно 350 В (рис. 1), соответственно напряжение статора будет еще выше. Максимальное выходное напряжение преобразователя частоты может быть меньше этого значения. Поэтому для ограничения напряжения на заданном уровне необходимо ввести обратную связь по абсолютному скольжению. Она может иметь следующий вид:

$$\frac{df_0[U_s]}{dt} = k_1 \cdot (U_s - U_{SM}) + k_2 \cdot \frac{dU_s}{dt},$$

или, если перейти к приращениям на малом временном интервале Δt :

$$Z = f_0[U_s]_n + k_1 \cdot (U_s - U_{SM}) \cdot \Delta t + k_2 \cdot \Delta U_s;$$

$$f_0[U_s]_{n+1} = \begin{cases} Z, & \text{при } Z > 0; \\ 0, & \text{при } Z \leq 0, \end{cases}$$

где k_1, k_2 – коэффициенты, ΔU_s – приращение напряжения статора на временном интервале Δt , U_{SM} – максимально допустимое напряжение статора.

Тогда общий алгоритм управления будет иметь вид:

$$f_s = \frac{pn}{60} + \frac{R_r}{2\pi(L_r + L_M)} + \Delta s_{\text{Нас}} + f_0[U_s];$$

$$\begin{cases} Z = f_0[U_s]_n + k_1 \cdot (U_s - U_{SM}) \cdot \Delta t + k_2 \cdot \Delta U_s; \\ f_0[U_s]_{n+1} = \begin{cases} Z, & \text{при } Z > 0; \\ 0, & \text{при } Z \leq 0; \end{cases} \end{cases}$$

$$\begin{cases} Y = b1 \cdot I_s - b2; \\ \Delta s_{\text{Нас}} = \begin{cases} Y, & \text{при } Y > 0; \\ 0, & \text{при } Y \leq 0, \end{cases} \end{cases}$$

где $b1, b2$ – коэффициенты.

В этом выражении первые два слагаемые обеспечивают максимум момента вне области насыщения, третье слагаемое учитывает эффект насыщения и вместе с первыми двумя обеспечивает максимум момента в области насыщения. Четвертое слагаемое ограничивает напряжение статора.

Работу данного алгоритма управления продемонстрируем, проведя расчет процесса разгона от нулевой до номинальной скорости с последующей ее стабилизацией, для двигателя типа 4А160М4У3 при постоянном моменте сопротивления, равном 20 Нм и моменте инерции 20 кг·м² (рис. 9) с использованием модели [10]. Приняты следующие значения коэффициентов $b1=0,0165$, $b2=0,1815$, $k_1=1$, $k_2=0,3$, напряжение ограничено на уровне $U_{SM}=325$ В. Во время процесса разгона ток статора максимален и равен номинальному току (50 А). При переходе в установившийся режим ток снижается таким образом, чтобы электромагнитный момент был равен моменту сопротивления.

Как видно из графиков на протяжении практически всего времени разгона, за исключением начального и конечного участков, момент постоянен и практически равен максимально возможному моменту. Увеличение электромагнитного момента в начале разгона происходит не мгновенно, а за определенное время, которое обусловлено скоростью изменения тока намагничивания. В конце разгона напряжение статора достигает максимально допустимого значения, в результате чего увеличивается абсолютное скольжение таким образом, чтобы поддерживать напряжение на заданном уровне. При стабилизации оборотов для такого момента сопротивления магнитная цепь ненасыщена, абсолютное скольжение практически соответствует оптимальному (2).

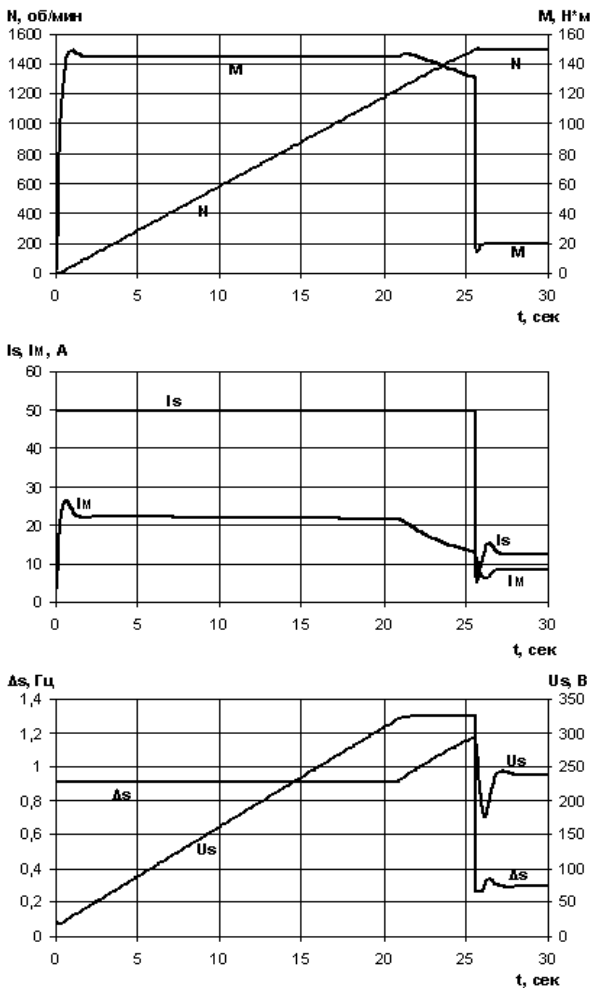


Рисунок 9 – Переходні процеси:

- а) електромагнітного моменту і кулової швидкості;
- б) току намагнічування і току статора;
- в) абсолютного скользяння і напруги статора

Следует отметить, что при введении магнитной системы в область насыщения увеличиваются потери в стали, поэтому для анализа процессов с точки зрения энергоэффективности необходимо определить потери в стали и оценить общие потери двигателя.

Выводы. В результате проведенных исследований было установлено:

1. Для получения максимального электромагнитного момента в установившихся режимах при ограничении тока статора необходимо ввести

магнитную систему асинхронного двигателя в насыщение.

2. Использование предложенного алгоритма управления позволяет увеличить электромагнитный момент более чем на 35 % по сравнению с максимально возможным моментом при отсутствии насыщения, и тем самым снизить время переходных процессов.

3. Для определения энергоэффективности использования предложенного алгоритма необходимо учесть потери в стали и общие потери в асинхронном двигателе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

1. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, – 1985, – 560 с.
2. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, – 1994, – 318 с.
3. Leonhard W. Control of electrical drives. – Springer, – 2001, – 470 p.
4. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Энергоиздат, – 1982, – 216 с.
5. Шрейнер Р.Т., Дмитренко Ю.А. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами. – Кишинев: Штиинца, – 1994, – 224 с.
6. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Энергия, 1974, – 328 с.
7. Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
8. Попович М.Г., Борисюк М.Г., Гаврилук В.А. та ін. Теорія електропривода. – К.: Вища шк., 1993. – 494 с.
9. Wasynczuk O., Sudhoff S.D., Corzine K.A., Tichenor J.L., Krause P.C., Hansen I.G., Taylor L.M. A maximum torque per ampere control strategy for induction motor drives. // IEEE Transactions on energy conversion, 1998, vol. 13, № 2, P. 163-169.
10. Стаценко А.В., Комаров Н.С., Мазуренко Л.И. Модель асинхронного двигателя для анализа динамики электропривода с частотно-токовым управлением на основе следящих импульсных регуляторов тока. // Праці інституту електродинаміки НАН України, - Збірник наукових праць № 1(10), - К., – 2005. – С. 69-79.

Стаття надійшла 11.04.2007 р.