

зависимостей значение угла и потерь снижаются при использовании данного метода.

На рис. 12, 13 представлены зависимости изменения амплитуды напряжения для получения оптимального режима и потерь в стали машины. Из представленных характеристик видно, что снижение амплитуды напряжения вызывает снижение магнитного потока машины и, следовательно, снижение потерь в стали машины, что также уменьшает общие потери в двигателе.

Отыскание вместо оптимального минимального значения угла φ приводит к тому, что двигатель

работает в зоне своего критического момента. Так как угол φ характеризует соотношение потребления активной и реактивной составляющих тока статора, то его минимум будет соответствовать режиму работы АД, когда магнитный поток машины будет минимально возможным, а для того, чтобы получить требуемое значение электромагнитного момента [2], ток статора начнет возрастать. Это приведет к росту потерь в меди, с одной стороны, и отсутствию запаса по перегрузочной способности АД, с другой. Поэтому необходимо контролировать значение тока статора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилов П. Д. Автоматизированный электропривод горных и транспортных машин Кемерово, КузПИ, 1976. – 62с., ил.
2. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. -М.: Наука, 1955. – 212 с. 1966. – 297с.
3. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. -3-е перераб. изд. -М.: Энергоиздат, 1982. -216 с. ил.
4. В. А. Шубенко. Оптимизация частотноуправляемого асинхронного электропривода по минимуму тока./ Шубенко В. А., Шрейнер Р. Т., Мищенко В. А.// Электричество. 1970. №9. с. 23-26.
5. Tsvitse P. J., Klingshizn E. A. Optimum voltage and frequency power supplies. – IEEE Trans. Ind. And Gen. Appl., 1971 vol. 7, p. 480 – 487.
6. Костенко М. П. Электрические машины. Спец. Часть. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1949. – 712с.
7. В. А. Шубенко. Оптимальное частотно-токовое управление асинхронным электроприводом. Шубенко В. А., Шрейнер Р. Т., Мищенко В. А.// Изв. вузов, Горный журнал. 1970. №1.
8. В. А. Шубенко. Частотно-управляемый асинхронный электропривод с оптимальным регулированием абсолютного скольжения. Шубенко В. А., Шрейнер Р. Т., Мищенко В. А.// Изв. вузов, Электромеханика. 1970. №6.
9. Мищенко В. А. Оптимальный по минимуму потерь закон частотного управления асинхронным двигателем. Мищенко В. А., Шрейнер Р. Т., Шубенко В. А.// Изв. вузов, Энергетика. 1969. №3.
10. Иванов В. Л. К частотному пуску электродвигателей забойных машин. Иванов В. Л., Тимофеева Л. И., Гаврилов П. Д.// Изв. вузов, Электромеханика. 1973. №2.
11. Иванов В. Л. Частотное управление асинхронным двигателем с поддержанием постоянного значения коэффициента мощности. Иванов В. Л., Тимофеева Л. И., Гаврилов П. Д., Ещин Е. К.// Взрывозащищенное и рудничное электрооборудование – Труды НИИ завода «Кузбассэлектромотор», Кемерово, вып. 6, 1973.

□ Авторы статьи:

Гаврилов
Петр Данилович
- канд. техн. наук, доц.
каф.электропривода и автоматизации

Неверов
Андрей Александрович
- асс.каф. электропривода и
автоматизации

УДК 621.313.333

П. Д. Гаврилов, А. А. Неверов

УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ В СИСТЕМАХ С ОРИЕНТИРОВАНИЕМ УПРАВЛЯЮЩЕГО ВЕКТОРА ПО ПОЛЮ ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОЙ НАГРУЗКЕ

Управление асинхронным двигателем (АД) в системах, ориентированных по полю машины, в большинстве случаев [1-3] осуществляется в системе координат, ориентированной по

вектору потокосцепления ротора. В пользу выбора именно этого вектора говорят следующие преимущества: функциональная схема такого электропривода имеет наименьшее чис-

ло перекрестных связей, а выражение момента АД и скорости сравнительно просты. При этом наиболее просто осуществляется регулирование скорости при стабилизации потокосцеп-

ления ротора.

Общий принцип моделирования и построения таких систем управления АД заключается в том, что для этого используется система координат, постоянно ориентированная по направлению какого-либо вектора, определяющего электромагнитный момент. Тогда проекция этого вектора на другую ось координат и соответствующее ей слагаемое в выражении для электромагнитного момента равны нулю, и формально оно принимает вид, идентичный выражению для электромагнитного момента двигателя постоянного тока, пропорционального по величине току якоря и основному магнитному потоку.

Обобщенная модель машины, записанная в системе координат, ориентированной по вектору потокосцепления ротора, выглядит следующим образом [4]:

$$\begin{aligned} L_{\sigma e} \frac{di_{sd}}{dt} &= -R_s i_{sd} - \frac{L_m}{L_r} \times \\ &\frac{d\psi_{rm}}{dt} + \omega_{\psi} L_{\sigma e} i_{sq} + U_{sd}, \\ L_{\sigma e} \frac{di_{sq}}{dt} &= -R_s i_{sq} - \omega_{\psi} \times \\ &\left(L_{\sigma e} i_{sd} + \frac{L_m}{L_r} \psi_{rm} \right) + U_{sq}, \\ \frac{d\psi_{rm}}{dt} &= \frac{L_m}{T_r} i_{sd} - \frac{1}{T_r} \psi_{rm}, \\ 0 &= \frac{L_m}{T_r} i_{sq} - (\omega_{\psi} - \omega_e) \psi_{rm}, \\ \frac{d\gamma_{\psi}}{dt} &= \omega_{\psi}, \\ M_e &= p_n \frac{L_m}{L_r} \psi_{rm} i_{sq}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $R_s, R_r, R_{\sigma}, R_r$ - активные сопротивления соответственно статора и ротора; L_r, L_m - полная индуктивность обмотки ротора, взаимная индуктивность;

$$L_{\sigma e} = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_r}$$

- эквивалентная индуктивность рассеяния двигателя; T_r - постоянная времени ротора; ψ_{rm} - модуль потокосцепления ротора; $i_{sd}, i_{sq}, U_{sd}, U_{sq}$ - токи и напряжения статора соответственно по осям d, q ; ω_{ψ}, ω_e - частота вращения вектора потокосцепления ротора и электрическая частота вращения ротора соответственно; p_n - число пар полюсов; M_e - электромагнитный момент АД.

Проанализировав систему (1), можно сделать вывод о том, что составляющая вектора токов статора i_{sd} определяет, подобно двигателю постоянного тока с независимым возбуждением, магнитный поток машины, а составляющая i_{sq} , при неизменном значении потокосцепления ротора, создает электромагнитный момент АД. Поэтому в качестве источника питания, с точки зрения простоты организации управления моментом АД, был выбран регулируемый источник тока (РИТ). Тогда система (1) переписывается следующим образом [4]:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{rm}}{dt} &= \frac{L_m}{T_r} k_i u_{zd} - \frac{1}{T_r} \psi_{rm}, \\ 0 &= \frac{L_m}{T_r} k_i u_{zq} - (\omega_{\psi} - \omega_e) \psi_{rm}, \\ \frac{d\gamma_{\psi}}{dt} &= \omega_{\psi}, \\ M_e &= p_n \frac{L_m}{L_r} \psi_{rm} k_i u_{zd}, \end{aligned} \quad (2)$$

где u_{zd}, u_{zq} - сигналы задания намагничивающего и моментобразующего токов АД, k_i - коэффициент усиления РИТ.

Формирование напряжений, необходимых для обеспечения заданных значений намагничивающего и моментобразующего токов АД, представлено в следующем виде:

$$\begin{aligned} U_{sd} &= k_i (u_{zd} - i_{sd}), \\ U_{sq} &= k_i (u_{zq} - i_{sq}), \end{aligned} \quad (3)$$

Для формирования обратных связей по токам i_{sd}, i_{sq} и получения переменных составляющих вектора напряжения в неподвижных относительно статора осях α, β используются преобразователи координат, которые, в свою очередь, используют информацию об угловом положении ориентированной по полю системы координат (в данном случае используется косвенное ориентирование по полю):

$$\begin{aligned} \gamma_{\psi}(t) &= \int_0^t \omega_{\psi} dt = \\ &= \int_0^t \left(\omega_e + \frac{L_m u_{zq}}{T_r \psi_{rm}} \right) dt. \end{aligned} \quad (4)$$

АД в процессе моделирования был представлен системой уравнений обобщенной машины в осях α, β , поэтому составляющие напряжения, прикладываемые на статор, имеют вид:

$$\begin{bmatrix} U_{s\alpha} \\ U_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{sd} \cos \gamma_{\psi} - U_{sq} \sin \gamma_{\psi} \\ U_{sd} \sin \gamma_{\psi} - U_{sq} \cos \gamma_{\psi} \end{bmatrix} \quad (5,а)$$

а токи в обратных связях:

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \cos \gamma_{\psi} + i_{s\beta} \sin \gamma_{\psi} \\ -i_{s\alpha} \sin \gamma_{\psi} + i_{s\beta} \cos \gamma_{\psi} \end{bmatrix} \quad (5,б)$$

При моделировании электромеханических процессов в АД рассматривались две системы: с регулированием частоты вращения и с регулированием электромагнитного момента АД. Использование регулятора частоты вращения в системе ориентированного по полю управления приводит, как будет показано ниже (рис. 1, 3), к зависимости электромагнитного момента от частоты вращения, или, что то же самое, момент АД будет стремиться повторить момент нагрузки для обеспечения лучшей стабилизации угловой скорости вращения вала.

Применение такого варианта структуры системы управления АД для машин с произвольной нагрузкой на рабочем органе неприемлемо, так как для этого типа нагрузок наибо-

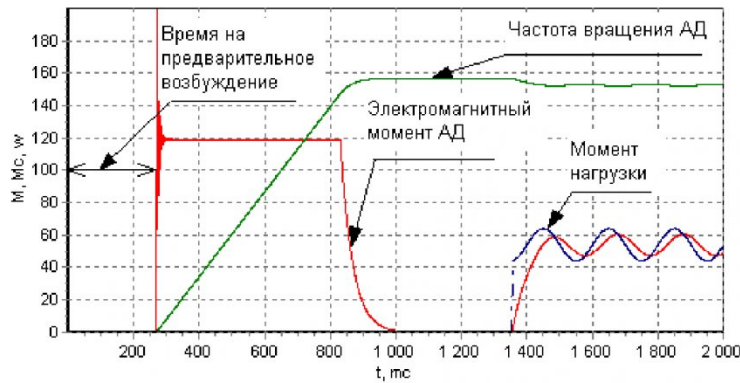


Рис. 1. Механические характеристики в САР скорости (время на возбуждение машины составляет 268,5 мс)

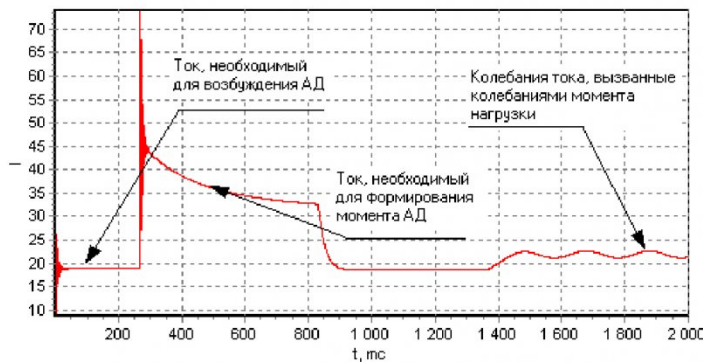


Рис. 2. Изменение модуля тока статора в САР скорости (время на возбуждение машины составляет 268,5 мс)

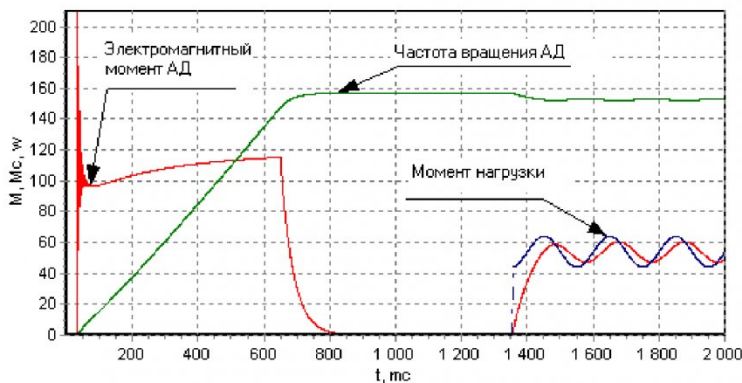


Рис. 3. Механические характеристики в САР скорости (время на возбуждение машины составляет 30 мс)

лее важным критерием является стабилизация электромагнитного момента: это ведет к увеличению долговечности механического канала электропривода.

Формирование задания на моментобразующий ток для САР скорости получаем из последнего уравнения системы (2):

$$U_{zq} = \frac{L_r}{p_n L_m \psi_r} (\omega_z - \omega) k_m, \quad (6)$$

где ω_z, ω - заданная и текущая частота вращения вала; k_m - коэффициент усиления регулятора скорости.

Задание на намагничивающий ток получим, если рассмотрим первое уравнение системы (2) для установившегося режима:

$$U_{zd} = \frac{(\psi_{rz} - \psi_r)}{L_m} k_{\psi}, \quad (7)$$

где ψ_{rz}, ψ_r - соответственно

заданное и текущее значение модуля потокосцепления ротора; k_{ψ} - коэффициент усиления регулятора потокосцепления ротора. Обратная связь по потокосцеплению ротора в выражении (3), при соответствующей настройке регулятора, может обеспечить оптимальное, с точки зрения минимального энергопотребления, регулирование.

Применяя на практике описанный выше принцип управления, необходимо помнить, что при включении электропривода требуется разносить во времени процессы предварительного возбуждения и регулирования момента АД, так как в знаменатель формулы моментобразующего тока (6) входит текущее потокосцепление ротора.

Ниже представлены характеристики для САР скорости с различным временем предварительного возбуждения машины (рис. 1-4). Как видно из рис. 2, 4 всплеск модуля тока статора с уменьшением времени на предварительное возбуждение увеличивается, что подтверждает вышесказанное, а также следует из физического смысла формулы момента АД (последняя формула системы (1)): для получения заданного значения момента требуется заданное значение потокосцепления ротора и заданное значение моментобразующего тока, следовательно, при меньшем значении потокосцепления ротора, необходимо большее значение тока. Также с уменьшением времени на возбуждение машины ухудшается форма момента в начальный период пуска, что показано на рис. 1, 3.

На рис. 5, 6 представлены характеристики для САР момента АД. Процессы, связанные с изменением времени на предварительное возбуждение машины, остаются теми же, что и для САР скорости. Электромагнитный момент АД в процессе работы остается неизменным и равным заданному, а, так как

регулятор скорости в этой системе отсутствует, то для разгона АД до заданной частоты вращения применяется отсечка по моменту. При переменном моменте нагрузки на валу двигателя, частота вращения АД также будет колебаться, что может привести либо к сильному увеличению угловой скорости вращения, либо к стопорению рабочего органа. Для того чтобы можно было избежать описанных явлений, необходимо задавать пределы для изменения частоты вращения, в границах которых момент АД оставался бы постоянным. При превышении верхнего или нижнего предела изменения частоты вращения должно происходить соответствующее изменение величины электромагнитного момента. Описание данного алгоритма управления моментом требует отдельной статьи.

Сравнивая изменение модуля тока на рис. 2, 6, можно сделать вывод, что стабилизация момента в САР момента приводит также к стабилизации модуля тока статора.

Для моделирования режимов работы АД использовался двигатель марки 4А132М4, $P_{ном}=11$ кВт, $I_n=21,53$ А, $U_{фном}=380$ В, $M_{ном}=54,1$ Нм.

Момент нагрузки на валу изменяется в соответствии с выражением :

$$M_c = 20 + 20 \cdot \sin(6.28 \cdot 5 \cdot t). \quad (8)$$

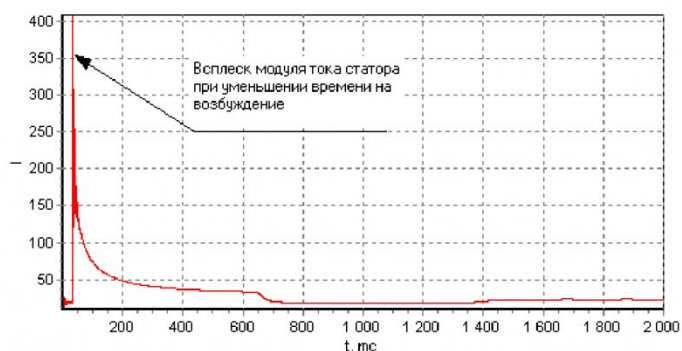


Рис. 4. Изменение модуля тока статора в САР скорости (время на возбуждение машины составляет 30 мс)

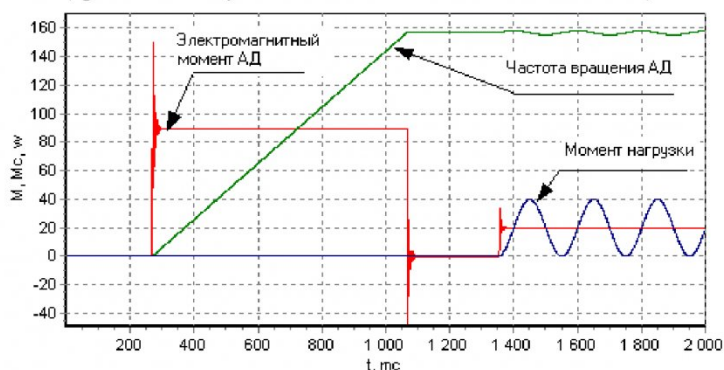


Рис. 5. Механические характеристики в САР момента (время на возбуждение машины составляет 268,5 мс)

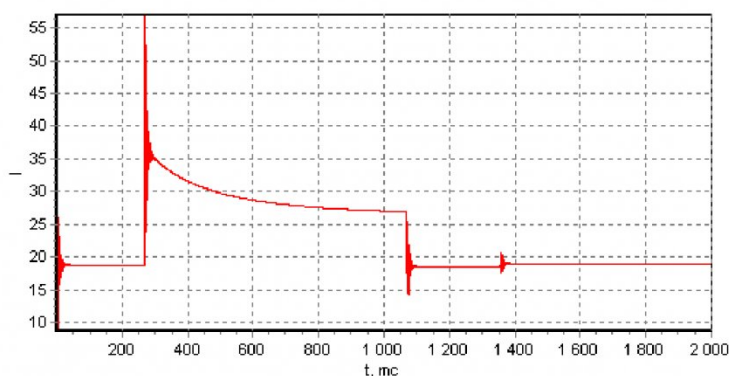


Рис. 6. Изменение модуля тока статора в САР момента (время на возбуждение машины составляет 268,5 мс)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Blaschke F. Das prinzip der Feldorientierung die Grundlage für die Transvektor-Regelung von Drehfeldmaschinen// Siemens Zeitschrift, 1971/ Bd. 45, - Н. 10. – S. 757-760.
2. Слежановский О. В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями. / Слежановский О. В., Дацковский Л. Х., Кузнецов И. С. – М., Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
3. Рудаков В. В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением./ Рудаков В. В., Столяров И. М., Даргау В. А. – Л. Энергоатомиздат, 1985. – 136 с.
4. Панкратов В. В. Векторное управление асинхронными электроприводами. / - Новосибирск, Изд-во НГТУ, 1999. – 66 с.

□ Авторы статьи:

Гаврилов
Петр Данилович
- канд. техн. наук, доц.
каф.электропривода и автоматизации

Неверов
Андрей Александрович
- асс.каф. электропривода и
автоматизации