

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРИВОДА МОТАЛКИ

Лимонов Л.Г., к.т.н.

АОЗТ "Тяжпромавтоматика", Украина, 61072, Харьков, пр. Ленина, 56
тел. (057)758-64-88, e-mail: lgl@tpa5.vk.kh.ua

Стаття присвячена розгляданню питань використання асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором для приводу моталки прокатного стана або агрегата обробки прокатаної полоси, з використанням різних систем керування з частотним регулюванням швидкості.

Стаття посвящена рассмотрению вопросов использования асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором для привода моталки прокатного стана или агрегата обработки прокатанной полосы, с применением различных систем управления при частотном регулировании скорости.

Известны системы управления тиристорным электроприводом моталки с использованием приводного электродвигателя постоянного тока [1, 2]. Эти системы обеспечивают поддержание постоянного натяжения полосы путем увеличения момента двигателя с одновременным снижением скорости вращения.

Современной альтернативой такому электроприводу моталки является электропривод переменного тока по системе преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель, с использованием преобразователя частоты с векторным управлением. В таком преобразователе осуществляется раздельное управление двумя составляющими тока статора электродвигателя – активной и реактивной (поток возбуждения) благодаря наличию двух регуляторов и, соответственно, двух независимых контуров регулирования. Применение такого электропривода для моталки полосы дает возможность построить несколько вариантов систем управления, которые отличаются степенью использования основных параметров приводного электродвигателя.

Ниже рассматривается использование асинхронного электродвигателя при различных вариантах построения системы управления. При этом приняты следующие обозначения: d - диаметр барабана моталки, D_m - максимальный диаметр рулона, T - максимальное натяжение, а V - максимальная скорость полосы. В качестве допущения не учитывается насыщение магнитной системы электродвигателя, принято, что потокосцепление пропорционально реактивной составляющей тока статора, следовательно, вращающий момент электродвигателя [3, 4] пропорционален произведению

$$M \equiv I_{sq} \cdot \Psi \equiv I_{sq} \cdot I_{sd}, \quad (1)$$

где I_{sq}, I_{sd} - составляющие тока статора, а Ψ - потокосцепление электродвигателя.

ОДНОДИАПАЗОННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ ПОТОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ

При такой системе управления, в процессе намотки величина активной составляющей тока статора I_{sq} поддерживается постоянной в соответствии с величиной заданного натяжения, и при номинальной

величине $I_{sq} = I_{sqn}$ натяжение полосы равно максимальному значению T .

Увеличение момента электродвигателя при росте диаметра рулона в процессе намотки и, соответственно, снижение его частоты вращения обеспечивается увеличением реактивной составляющей тока статора I_{sd} от минимального значения

$$I_{sd \min} = \frac{I_{sdn}}{K_\omega} \quad (2)$$

при минимальном d до номинальной величины I_{sdn} при максимальном диаметре рулона D_m . В выражении (2) введено обозначение коэффициента

$$K_\omega = \frac{D_m}{d}, \quad (3)$$

характеризующего требуемый диапазон регулирования частоты вращения электродвигателя.

Особенностью рассматриваемой системы управления является то, что при достижении максимального диаметра D_m электродвигатель выходит на номинальные значения частоты вращения, частоты и амплитуды питающего напряжения, а регулирование его частоты вращения в процессе намотки производится увеличением частоты питающего напряжения сверх номинального значения. Это означает, что электродвигатель должен допускать возможность увеличения частоты вращения в K_ω раз по сравнению с номинальной. Требуемые величины номинальных параметров - момента и мощности приводного электродвигателя определяются следующими выражениями

$$M_n \geq \frac{T \cdot D_m}{2}; \quad (4)$$

$$P_n \geq M_n \cdot \omega_n. \quad (5)$$

Рассмотрим, как загружен электродвигатель в цикле намотки рулона, используя методику, основные допущения и некоторые выражения из [1]. Закон изменения реактивной составляющей тока статора в процессе намотки рулона описывается выражением

$$I_{sd1} = I_{sdn} \frac{D}{D_m} = \frac{I_{sdn} \cdot D}{K_\omega \cdot d}, \quad (6)$$

в котором D - текущее значение диаметра рулона, равное при толщине полосы h и скорости V [1]

$$D = d \sqrt{1 + \frac{4h \cdot V \cdot t}{\pi \cdot d^2}}. \quad (7)$$

Эквивалентный (среднеквадратичный) ток за цикл намотки рулона

$$I_{sd1\varepsilon} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} I_{sd1}^2 \cdot dt}, \quad (8)$$

где T_0 - время намотки рулона максимального диаметра, равное из (7)

$$T_0 = \frac{\pi \cdot d^2 (K_\omega^2 - 1)}{4h \cdot V}. \quad (9)$$

Используя выражения (6) и (9), из (8) получаем

$$I_{sd1\varepsilon} = I_{sdn} \sqrt{\frac{K_\omega^2 + 1}{2K_\omega^2}}. \quad (10)$$

Теперь, с учетом известных соотношений $I_{sdn} = I_{sn} \cdot \sin \varphi$ и $I_{sqn} = I_{sn} \cdot \cos \varphi$ найдем эквивалентный ток статора за цикл намотки из равенства

$$I_{s1\varepsilon} = \sqrt{I_{sdn}^2 + I_{sq1\varepsilon}^2}. \quad (11)$$

После подстановки в (11) полученного значения (10) и преобразования получим выражение полного тока статора электродвигателя за цикл намотки

$$I_{s1\varepsilon} = I_{sn} \sqrt{\frac{K_\omega^2 + 1}{2K_\omega^2} + \frac{K_\omega^2 - 1}{2K_\omega^2} \cos^2 \varphi}. \quad (12)$$

Численный анализ полученного выражения показывает, что рассмотренная система управления обеспечивает неплохое использование приводного электродвигателя в цикле намотки рулона: так, при изменении величины K_ω в диапазоне от 2 до 6 коэффициент использования электродвигателя при его коэффициенте мощности равном 0,8 находится в диапазоне от 0,93 до 0,908.

ОДНОДИАПАЗОННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ БЕЗ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОТОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ

В процессе намотки рулона в такой системе величина реактивной составляющей тока статора поддерживается постоянной и равной номинальной I_{sdn} . Увеличение момента электродвигателя по мере роста диаметра рулона производится путем увеличения активной составляющей тока статора от минимального

$$I_{sq2 \min} = \frac{I_{sqn}}{K_\omega} \quad (13)$$

до номинального значения I_{sqn} при максимальном диаметре рулона D_m . Частота вращения приводного электродвигателя при этом снижается от номинальной при минимальном диаметре рулона до минимальной при максимальном диаметре рулона, благодаря соответствующему снижению частоты и амплитуды питающего напряжения, то есть регулирование частоты вращения электродвигателя производится вниз от номинальной. Величина момента приводного элек-

тродвигателя для создания натяжения T определяется (4), а номинальная мощность электродвигателя будет

$$P_{n2} \geq M_n \cdot \omega_{\max} = P_{n1} \cdot K_\omega \quad (14)$$

в K_ω раз выше, а номинальная частота вращения в K_ω раз ниже, чем в предыдущем случае.

Так же, как и в предыдущем случае, рассмотрим, как загружен электродвигатель в цикле намотки. Закон изменения активной составляющей тока статора в процессе намотки рулона имеет вид, подобно (6)

$$I_{sq2} = I_{sqn} \frac{D}{D_m} = \frac{I_{sqn} \cdot D}{K_\omega \cdot d}, \quad (15)$$

а среднеквадратичное значение за цикл намотки рулона равно

$$I_{sq2\varepsilon} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} I_{sq2}^2 \cdot dt}. \quad (16)$$

Подставив в (15) T_0 из (9), D из (7) и I_{sq2} из (15), после интегрирования получаем

$$I_{sq2\varepsilon} = I_{sq2n} \sqrt{\frac{K_\omega^2 + 1}{K_\omega^2}}. \quad (17)$$

Теперь, используя (11), после подстановки полученного значения (16) найдем величину эквивалентного полного тока электродвигателя за цикл намотки рулона максимального диаметра

$$I_{s2\varepsilon} = I_{sn} \sqrt{1 - \frac{K_\omega^2 - 1}{2K_\omega^2} \cos^2 \varphi}. \quad (18)$$

Анализ выражения (18) показывает, что рассмотренная система управления обеспечивает худшее использование приводного электродвигателя в цикле намотки, чем предыдущая: так, при изменении величины K_ω в диапазоне от 2 до 6 коэффициент использования электродвигателя при его коэффициенте мощности равном 0,8 находится в диапазоне от 0,87 до 0,83.

ДУХДИАПАЗОННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Применение двухдиапазонной системы управления позволяет использовать асинхронный электродвигатель с меньшей требуемой величиной диапазона регулирования частоты вращения ослаблением потока возбуждения по сравнению с однодиапазонной системой с регулированием потока возбуждения, и в то же время меньшей требуемой мощности, чем при применении однодиапазонной системы без регулирования потока возбуждения.

В этой системе, в отличие от двух рассмотренных выше, цикл намотки рулона максимального диаметра разделяется на два диапазона: первый - от минимального диаметра рулона d до некоторого промежуточного D_0 , и второй - от диаметра D_0 до максимального D_m . В первом диапазоне, при постоянной величине активной составляющей тока статора, равной минимальному значению

$$I_{sq31 \min} = I_{sqn} \frac{D_0}{D_m}, \quad (19)$$

и номинальном напряжении снижение частоты вращения электродвигателя производится посредством увеличения реактивной составляющей тока статора (потока возбуждения) от минимальной величины

$$I_{sd31\min} = I_{sqn} \frac{d}{D_0} \quad (20)$$

до номинальной, которая достигается при диаметре рулона D_0 . Во втором диапазоне, при увеличении диаметра рулона от D_0 до D_m поток возбуждения электродвигателя поддерживается постоянным, равным номинальному, а увеличение момента электродвигателя происходит путем увеличения активной составляющей тока от минимального до номинального значения, которое достигается при максимальных величинах натяжения и диаметра рулона. Снижение частоты вращения электродвигателя в этом диапазоне производится снижением частоты и амплитуды питающего напряжения.

Применение рассматриваемой системы управления позволяет применить в качестве приводного электродвигателя с меньшим диапазоном регулирования частоты вращения свыше номинальной, равным отношению

$$K_0 = \frac{D_0}{d} \quad (21)$$

Требуемый номинальный момент электродвигателя определяется выражением (4), а номинальная частота вращения достигается при диаметре D_0 , таким образом, мощность электродвигателя для создания натяжения T равна

$$P_{n3} = M_n \cdot \omega_0 = P_{n1} \frac{d}{D_0} = P_{n1} \frac{K_0}{K_0} \quad (22)$$

Рассмотрим, как загружен электродвигатель в цикле намотки рулона при использовании двухдиапазонной системы управления.

В первом диапазоне намотки активная составляющая тока статора не изменяется, а реактивная составляющая изменяется по закону

$$I_{sd31} = I_{sdn} \frac{D}{D_0} \quad (23)$$

Используя (7), найдем время намотки рулона в первом диапазоне

$$T_1 = \frac{\pi \cdot d^2 (K_0^2 - 1)}{4h \cdot V} \quad (24)$$

Из (8), применительно к первому диапазону намотки, можно записать выражение эквивалентного значения реактивной составляющей тока

$$I_{sd31\text{э}} = \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} I_{sd31}^2 \cdot dt}, \quad (25)$$

которое после подстановки (24) дает

$$I_{sd31\text{э}} = I_{sdn} \sqrt{\frac{1+K_0^2}{2K_0^2}} \quad (26)$$

Используя теперь (11) с учетом (19), получим выражение эквивалентного полного тока статора в первом диапазоне намотки

$$I_{s31\text{э}} = I_{sn} \sqrt{\frac{1+K_0^2}{2K_0^2} - \frac{K_0^2 \cdot K_\omega^2 + K_\omega^2 - 2K_0^4}{2K_0^2 \cdot K_\omega^2} \cos^2 \varphi} \quad (27)$$

Во втором диапазоне реактивная составляющая тока статора не изменяется и равна номинальному значению I_{sdn} , а активная составляющая увеличивается пропорционально диаметру рулона по закону

$$I_{sq32} = I_{sq31} \frac{D}{D_0} = I_{sqn} \frac{D}{K_\omega \cdot d} \quad (28)$$

Используя (7), применительно ко второму диапазону намотки, найдем время намотки во втором диапазоне

$$T_2 = \frac{\pi \cdot d^2 (K_\omega^2 - K_0^2)}{4h \cdot V} \quad (29)$$

а затем, аналогично предыдущему случаю, из выражения эквивалентного значения активной составляющей тока в этом диапазоне намотки

$$I_{sq32\text{э}} = \sqrt{\frac{1}{T_2} \int_0^{T_2} I_{sq32}^2 \cdot dt} \quad (30)$$

с учетом (28) и (29) находим

$$I_{sq32\text{э}} = I_{sqn} \sqrt{\frac{K_0^2 + K_\omega^2}{2K_\omega^2}} \quad (31)$$

Используя выражение (11) с учетом (31), получим значение эквивалентного полного тока статора во втором диапазоне намотки

$$I_{s32\text{э}} = I_{sn} \sqrt{1 - \frac{K_\omega^2 - K_0^2}{2K_\omega^2} \cos^2 \varphi} \quad (32)$$

Величину эквивалентного полного тока электродвигателя за весь цикл намотки максимального диаметра определим, используя известную формулу

$$I_{s3\text{э}} = \sqrt{\frac{I_{s31\text{э}}^2 T_1 + I_{s32\text{э}}^2 T_2}{T_0}} \quad (33)$$

которая после подстановки и преобразования дает следующее выражение (в общем виде)

$$I_{s3\text{э}} = I_{sn} \sqrt{A + B \cdot \cos^2 \varphi}, \quad (34)$$

в котором

$$A = \frac{2K_0^2 \cdot K_\omega^2 - K_0^4 - 1}{2K_0^2 (K_\omega^2 - 1)}; \quad (35)$$

$$B = -\frac{K_\omega^4 \cdot K_0^2 - K_\omega^2 \cdot K_0^4 + 2K_0^4 - K_\omega^2 - K_0^6}{2K_0^2 \cdot K_\omega^2 (K_\omega^2 - 1)} \quad (36)$$

А анализ выражения (34) показывает, что степень использования электродвигателя при применении двухдиапазонной системы управления не лучше, чем при применении предыдущей однодиапазонной системы без регулирования тока возбуждения.

Снижение требуемой мощности приводного электродвигателя и улучшение технико-экономических показателей электропривода моталки с асинхронным электродвигателем может быть достигнуто применением модифицированных систем управления. Основная особенность этих систем за-

ключается в том, что при их использовании, в процессе намотки рулона с максимальным натяжением полюсы, часть цикла намотки рулона максимального диаметра происходит при токе статора электродвигателя, превышающем номинальное значение, но при этом среднеквадратичное значение тока за цикл намотки не превышает номинальной величины, что предотвращает перегрев электродвигателя. Ниже рассмотрены два варианта таких систем управления.

ОДНОДИАПАЗОННАЯ МОДИФИЦИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

В такой системе поток возбуждения электродвигателя в процессе намотки рулона поддерживается постоянным и равным номинальному, то есть уменьшение скорости электродвигателя производится путем снижения частоты питающего напряжения от номинального значения при минимальном диаметре рулона до минимального – при максимальном диаметре. Увеличение момента электродвигателя при намотке производится путем увеличения активной составляющей тока статора сначала от минимального значения при минимальном диаметре рулона до номинального, которое достигается при некотором промежуточном диаметре рулона

$$D_m > D_i > d, \quad (37)$$

а затем дальнейшим увеличением сверх номинального значения, так что

$$I_{sq4 \min} = I_{sqn} \frac{d}{D_i}; \quad (38)$$

$$I_{sq4 \max} = I_{sqn} \frac{D_m}{D_i} = I_{sqn} \cdot K_i. \quad (39)$$

Номинальная частота вращения электродвигателя соответствует минимальному диаметру рулона, а номинальную мощность электродвигатель развивает при максимальном натяжении и диаметре рулона D , т.е.

$$P_{n4} = P_n \frac{K_\omega}{K_i}. \quad (40)$$

Для анализа загрузки электродвигателя в рассматриваемой системе, используя примененную ранее методику, найдем эквивалентное значение активной составляющей тока статора за цикл намотки рулона максимального диаметра, принимая во внимание, что закон изменения этой составляющей имеет вид

$$I_{sq4} = I_{sqn} \frac{D}{D_i}, \quad (41)$$

$$I_{sq4\phi} = I_{sqn} \sqrt{\frac{K_i^2 (K_\omega^2 + 1)}{2K_\omega^2}}. \quad (42)$$

Соответственно, полный ток электродвигателя будет равен

$$I_{s4\phi} = I_{sn} \sqrt{1 - \frac{2K_\omega^2 - K_i^2 \cdot K_\omega^2 + K_i^2}{2K_\omega^2} \cos^2 \phi}. \quad (43)$$

Номинальной нагрузке электродвигателя за цикл намотки соответствует условие равенства $I_{sq4\phi}$ но-

минальному значению I_{sqn} , т.е. условие

$$\frac{K_i^2 (K_\omega^2 + 1)}{2K_\omega^2} = 1 \quad (44)$$

или

$$K_i = K_\omega \sqrt{\frac{2}{K_\omega^2 + 1}}, \quad (45)$$

из которого можно найти величину коэффициента K_i по известной величине диапазона изменения диаметра рулона K_ω .

ДВУХДИАПАЗОННАЯ МОДИФИЦИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Намотка рулона при применении этой системы, как и при использовании обычной двухдиапазонной системы, происходит в два этапа. Сначала, в первом диапазоне, при изменении диаметра рулона от d до D_0 , намотка происходит при постоянной величине активной составляющей тока, равной

$$I_{sq51 \min} = I_{sqn} \frac{D_0}{D_i} = I_{sqn} \frac{K_0 \cdot K_i}{K_\omega} \quad (46)$$

и увеличении реактивной составляющей от минимальной величины, определяемой выражением

$$I_{sd51 \min} = I_{sdn} \frac{d}{D_0} = \frac{I_{sdn}}{K_0} \quad (47)$$

до номинального значения. При этом частота вращения электродвигателя снижается от максимального до номинального значения путем снижения частоты питающего напряжения при номинальной амплитуде.

При дальнейшем увеличении диаметра рулона в процессе намотки от величины D_0 до максимального значения D_m реактивная составляющая тока поддерживается номинальной, а активная - растет пропорционально диаметру, достигая номинального значения при диаметре D_i , и далее, при диаметре рулона D_m - максимального значения, которое равно

$$I_{sq5 \max} = I_{sqn} \frac{D_m}{D_i} = I_{sqn} \cdot K_i. \quad (48)$$

Частота вращения электродвигателя при этом снижается путем снижения частоты и амплитуды питающего напряжения. Таким образом, номинальная частота вращения приводного электродвигателя соответствует диаметру рулона D_0 и величина ее меньше, чем максимальная требуемая в K_0 раз, а потребная мощность электродвигателя равна

$$P_{n5} = P_n \frac{K_\omega}{K_0 \cdot K_i}. \quad (49)$$

Определить параметры приводного электродвигателя и произвести разбивку диапазонов регулирования при конструировании такой системы управления электроприводом моталки можно, используя нижеприведенные зависимости, которые получены с использованием примененной ранее методики.

Эквивалентное значение реактивной составляющей тока за время работы в первом диапазоне

$$I_{sd51\varnothing} = I_{sdn} \sqrt{\frac{K_0^2 + 1}{2K_0^2}}, \quad (50)$$

а эквивалентный полный ток электродвигателя в первом диапазоне, с учетом (46)

$$I_{s51\varnothing} = I_{sn} \sqrt{\frac{K_0^2 + 1}{2K_0^2} - \frac{K_0^2 \cdot K_\omega^2 + K_\omega^2 - 2K_0^4 \cdot K_i^2}{2K_0^2 \cdot K_\omega^2} \cos^2 \varphi}. \quad (51)$$

Во втором диапазоне обмотки при номинальной величине реактивной составляющей тока эквивалентное значение активной составляющей определяется выражением

$$I_{sq52\varnothing} = I_{sqn} \sqrt{\frac{K_0^2 \cdot K_i^2 + K_\omega^2 \cdot K_i^2}{2K_\omega^2}}, \quad (52)$$

а эквивалентный полный ток электродвигателя в этом диапазоне равен

$$I_{s52\varnothing} = I_{sn} \sqrt{1 - \frac{2K_\omega^2 - K_0^2 \cdot K_i^2 - K_\omega^2 \cdot K_i^2}{2K_\omega^2} \cos^2 \varphi}. \quad (53)$$

С учетом (51) и (53) определяется эквивалентный полный ток электродвигателя за цикл обмотки рулона, в общем виде

$$I_{s5} = I_{sn} \sqrt{P - Q \cdot \cos^2 \varphi}, \quad (54)$$

где

$$P = \frac{2K_0^2 \cdot K_\omega^2 - K_0^4 - 1}{2K_0^2 (K_\omega^2 - 1)}, \quad (55)$$

а

$$Q = \frac{K_0^6 \cdot K_i^2 - 2K_0^4 \cdot K_i^2 + K_0^4 \cdot K_\omega^2 - 2K_0^2 \cdot K_\omega^4 + K_0^2 \cdot K_i^2 \cdot K_\omega^4 + K_\omega^2}{2K_0^2 \cdot K_\omega^2 (K_\omega^2 - 1)}. \quad (56)$$

Очевидно, что для полного использования электродвигателя, его ток за цикл обмотки рулона должен быть равен номинальному, а для этого выражение, находящееся в (54) под знаком радикала, должно равняться 1. Как показал численный анализ, при реальных значениях K_ω (от 2 до 6) и коэффициента K_0 (от 1,1 до 1,5) величина слагаемого P с достаточной для инженерных расчетов точностью может быть принята равной 1 (максимальная погрешность достигает 12% при маловероятном сочетании значений $K_\omega = 2$ и $K_0 = 1,5$). Это означает, что полной загрузке приводного электродвигателя соответствует равенство нулю множителя Q , т.е.

$$K_0^6 \cdot K_i^2 - 2K_0^4 \cdot K_i^2 + K_0^4 \cdot K_\omega^2 - 2K_0^2 \cdot K_\omega^4 + K_0^2 \cdot K_i^2 \cdot K_\omega^4 + K_\omega^2 = 0. \quad (57)$$

Зная диапазон изменения диаметра рулона K_ω , задавшись максимальной и номинальной частотами вращения электродвигателя (K_0), из (57) можно определить величину коэффициента K_i , которая обеспечит желаемую загрузку электродвигателя при использовании рассматриваемой системы управления.

В заключение следует отметить, что любая из пяти рассмотренных систем управления может быть применена при конструировании новых или реконструкции действующих электроприводов намоточно-

размоточных механизмов полосового материала, в первую очередь, моталок и разматывателей станов холодной прокатки и агрегатов непрерывной обработки полосового материала (агрегатов непрерывного травления, цинкования, лужения и др.) с использованием в качестве приводного – асинхронного электродвигателя и с питанием его от преобразователя частоты с векторным управлением или с системой прямого управления моментом электродвигателя. При этом выбор системы управления должен определяться с учетом конкретных параметров механизма и желаемых энергетических показателей электромеханической системы. Полученные соотношения позволяют определить основные параметры приводного электродвигателя для конкретного использования любой из рассмотренных систем управления, причем в случае применения зависимостей, приведенных в разделах для модифицированных систем управления, обеспечивается некоторый запас по нагреву, так как не учтено время пауз на снятие смотанного рулона и заправку нового, а также благодаря неучтенной нелинейности магнитной системы электродвигателя.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дралюк Б.Н., Тикоцкий А.Е. Двухдиапазонное управление электродвигателем моталки стана рулонной прокатки листа Электричество, Москва, №5, 1969 г.
- [2] Альшиц В.М. Зеленцов В.И. Тикоцкий А.Е. Электроприводы моталок и разматывателей станов холодной прокатки. Москва. ИНФОРМЭЛЕКТРО. 1980 г.
- [3] Слежановский О.В., Дацковский Л.Х., Кузнецова И.С., Лебедев Е.Д., Тарасенко Л.М. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентиляемыми преобразователями, Москва, Энергоатомиздат, 1983г.
- [4] Перельмутер В.М. Прямое управление моментом и током двигателя переменного тока, Харьков, Основа, 2004 г.

Поступила 21.09.2006