

УДК 621.313.333

Оценка интенсивности процессов разгона и торможения индукционного двигателя на этапе проектирования машины*

В.А. ТЮКОВ¹, Е.О. ЛАВРЕНОВ²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, д. т. н., профессор кафедры электромеханики, e-mail: tyukov@em.power.nstu.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры электромеханики, e-mail: L.Evgen17@gmail.com

В процессе исследования очень часто сталкиваются с необходимостью упрощения рассматриваемого объекта, что реализуется посредством введения разнообразных допущений. В некоторых режимах это приводит к существенным количественным и качественным отклонениям расчетных динамических и статических характеристик электрической машины от реальных. Анализ процессов пуска и торможения асинхронных двигателей показывает, что принимаемые в расчетах допущения не отражают адекватно физический процесс разгона, поскольку при этом не учитывается влияние некоторых величин на его интенсивность. В данной статье рассмотрено влияние конструктивных параметров индукционного двигателя на величину критического скольжения и, следовательно, на процесс разгона. Приведены основные расчетные соотношения в относительных единицах для нахождения времени разгона и торможения по критическому и номинальному скольжению. Построены зависимости относительных угловых скоростей от времени для различных конструкций индукционных двигателей малой, средней и большой мощности. Сделаны выводы о применимости допущений при расчете пусковых процессов и влиянии критических скольжений и перегрузочной способности на время пуска. Указано, что на этапе проектирования, определив величины максимального момента и критического скольжения, можно оценить интенсивность разгона и быстродействие асинхронного двигателя.

Ключевые слова: индукционный двигатель, интенсивность процесса пуска, максимальный момент, критическое скольжение, постоянная времени, перегрузочная способность, разгон, торможение, противовключение

ВВЕДЕНИЕ

Многолетний опыт эксплуатации электрических машин показал, что в неустановившихся режимах амплитуды токов в обмотках могут достигать двадцатикратных значений номинального тока в зависимости от типа машины, её конструкции, а также характера режима. Однако достоверных методов расчета временных зависимостей токов в неустановившихся режимах до сих пор не найдено. Различные методы базируются на представлении электромеханических устройств в виде схем замещения или математических моделей, описывающих с учетом допущений уже не реальные физические процессы. К настоящему времени не удастся получить совпадения расчетных и экспериментальных временных зависимостей.

Принятая картина пуска индукционных двигателей выглядит следующим образом. Напряжение на обмотке статора создает в двигателе нормальное вращающееся магнитное поле и свободный магнитный поток, возбуждаемый апериодическими затухающими токами. Свободный магнитный поток неподвижен относительно статора и дополняет в момент включения вращающееся магнитное поле двигателя до нуля и, следовательно, имеет направление, проти-

* Статья получена 07 марта 2014 г.

воположное исходному направлению вращающегося поля. При этом считают, что возникают два накладывающихся друг на друга переходных процесса – электромагнитный, где создается затухающее неподвижное магнитное поле, взаимодействующее с вращающимся полем и одновременно происходит механический процесс разгона ротора двигателя.

Или при включении обмотки создаются свободные затухающие токи, которые определяют в соответствующих элементах цепи свободные заряды и магнитные потоки, затухающие с той же скоростью, что и вызвавшие их токи. Если активные и реактивные элементы цепи не постоянны, то уравнения, описывающие изменения токов во времени, становятся нелинейными, и применять разбиение токов на вынужденные и свободные составляющие уже невозможно. Возникают дополнительные возмущения, сопровождающиеся значительными сверхтоками и перенапряжениями, и требуются иные методы математического анализа.

Свободный магнитный поток не создает вращающего момента. Полезный вращающий момент создается вынужденным магнитным потоком – единственным потоком, который остается в магнитной цепи двигателя после переходного режима. Поэтому приходится идеализировать реальную картину допущением, что длительность электрического переходного процесса столь мала по сравнению со временем разгона двигателя, что эти два процесса протекают независимо друг от друга. Это означает, что переходные токи затухают при неподвижном роторе, а механический процесс разгона протекает так, как будто бы соответствующие электромагнитные величины уже успели установиться. Другое упрощающее анализ допущение: при пуске задается зависимость как вращающего момента, развиваемого двигателем, так и момента сопротивления нагрузки исключительно от скорости.

В то же время известно, что при пуске возникают два класса колебаний – электромеханические и электромагнитные, частоты которых отличаются более чем на два порядка. Электромеханические колебания имеют частоты на два порядка ниже электромагнитных. Природа колебаний связана с попеременным превращением энергии одного вида в энергию другого вида. Электромеханические колебания свидетельствуют о превращении энергии электромагнитного поля в механическую энергию, а взаимосвязанные изменения электрического и магнитного полей вызывают электромагнитные колебания – волны. Двойная природа колебаний позволяет также при решении технических задач ограничиваться более подробным анализом одного вида колебаний, не учитывая или учитывая приближенно факторы, порождающие колебания другого вида. Однако глубокий и точный анализ динамического процесса возможен, если учитывается не только изменение энергии магнитных и электрических полей, но и изменение кинетической энергии маховых масс привода.

Только в линейных системах существует пропорциональность между токами и напряжениями и их изменениями во времени. Изменения же запаса энергии происходят и при токах непериодической частоты. К описанию колебательных процессов и преодолению трудностей формальных расчетов можно привлечь теорию колебаний. Для исследования колебаний, описываемых синусоидальными (косинусоидальными) функциями, желательно использовать алгебру комплексных чисел.

И, наконец, длительность пуска зависит как от индуктивностей, активных сопротивлений цепей обмоток, так и от механического процесса, который определяется динамическим моментом инерции вращающихся масс и вращающим моментом, приложенным к ротору двигателя. Эти особенности желательно предвидеть, создавая математические решения и по возможности не отклоняясь от физической сущности процесса.

1. МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Вначале проводится анализ влияния различных параметров на процесс пуска асинхронных (индукционных) двигателей в предположении, что длительность электромагнитного процесса мала по сравнению со временем разгона двигателя, так что эти два процесса протекают независимо друг от друга.

Хорошо известна зависимость вращающего момента двигателя от угловой скорости, где момент изменяется по своеобразному закону, вследствие чего процесс разгона приобретает

особый характер. Начальный момент сравнительно мал, далее растет с увеличением частоты вращения и достигает максимума, а затем круто падает до незначительных величин (в идеале до нуля) при достижении скорости близкой к синхронной. Область нормального рабочего режима находится между точками, соответствующими синхронной частоте вращения и номинальному вращающему моменту.

Отклонение истинной скорости ротора (ω_2) от синхронной (ω_0) определяется скольжением:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega_2}{\omega_0} = 1 - \frac{\omega_0}{\omega_2}. \quad (1)$$

Установив скольжение, соответствующее максимальному вращающему моменту $M_{кр}$, как $s_{кр}$ – критическое скольжение, можно получить зависимость между относительными значениями вращающего момента $M / M_{кр}$ и скольжениями $s / s_{кр}$. Эта зависимость удовлетворительно воспроизводится приближенной формулой

$$\frac{M}{M_{кр}} = \frac{2}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}, \quad (2)$$

справедливой для всех значений скольжения.

Таким образом, отношение вращающего момента к его критическому значению зависит исключительно от отношения истинного скольжения к его критическому значению.

Критический вращающий момент $M_{кр}$ представляет собой один из параметров индукционного двигателя. С другой стороны, критическое скольжение равно отношению падения напряжения, создаваемого током короткого замыкания $I_{к2}$ (при неподвижном роторе) на активном сопротивлении цепи ротора r_2 к ЭДС E_2 , наводимой в неподвижной обмотке ротора, т. е.

$$s_{кр} = \frac{r_2 \cdot I_{к2}}{E_2}. \quad (3)$$

Скорость вращения с момента пуска растет до тех пор, пока разность ΔM между тормозным и вращающим моментами не обратится в нуль. Если силами трения пренебречь, то избыточный момент полностью расходуется на разгон инерционных масс и пропорционален ускорению ротора:

$$\Delta M(\omega) = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (4)$$

где J – момент инерции ротора и всех присоединенных к нему масс. Проинтегрировав полученное выражение, получим зависимость времени от угловой скорости.

Для сравнений следует ввести отношение избыточного момента к номинальному:

$$\frac{\Delta M(\omega)}{M_H} = \Delta(\omega), \quad (5)$$

и мгновенной угловой скорости к номинальной:

$$\frac{\omega}{\omega_H} = v. \quad (6)$$

Тогда зависимость принимает вид

$$t = \frac{J \cdot \omega_H}{M_H} \cdot \int \frac{1}{\Delta(\omega / \omega_H)} d(\omega / \omega_H) = T_a \cdot \int \frac{1}{\Delta(v)} dv. \quad (7)$$

Интеграл представляет собой безразмерную величину, непрерывно увеличивающуюся по мере роста относительной угловой скорости. Численное значение его зависит исключительно от закона избыточного момента со скоростью, пропорционально времени и является относительным временем разгона.

Постоянный множитель $J \cdot \omega_H / M_H = T_a$ зависит от параметров двигателя и сцепленных с ним механизмов и имеет размерность времени. Это время, необходимое для разгона двигателя (совместно с механизмом) до номинальной угловой скорости, начиная с неподвижного состояния, при номинальном вращающем (электромагнитном) моменте, постоянном в течение всего времени разгона или постоянной времени разгона (пуска).

Как следует из приведенного выше, производная от скольжения равна скорости изменения относительной угловой скорости, т. е. $ds/dt = -dv/dt$ или ускорению ротора. Следовательно, можно получить выражение для отношения вращающего (электромагнитного) момента к его максимальному значению:

$$\frac{M}{M_{кр}} = \frac{J \cdot \omega_0}{M_{кр}} \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{J \cdot \omega_0}{M_{кр}} \cdot \left(-\frac{ds}{dt} \right) = -T_{кр} \cdot \frac{ds}{dt}, \quad (8)$$

где $T_{кр}$ – критическая постоянная времени, аналогична T_a при максимальном моменте, ω_0 – синхронная скорость.

В результате можно получить выражение для максимального электромагнитного момента через максимальную электромагнитную мощность

$$P_{кр} = \omega_0 \cdot M_{кр} \quad (9)$$

и определить

$$T_{кр} = T_a \cdot \frac{M_H}{M_{кр}}. \quad (10)$$

Критическая постоянная времени меньше постоянной времени разгона в число раз, равное отношению $M_H / M_{кр}$, которое равно обратной величине перегрузочной способности двигателя:

$$K_{кр} = \frac{M_{кр}}{M_H}. \quad (11)$$

Следовательно,

$$T_a = K_{кр} \cdot T_{кр}. \quad (12)$$

Сопоставив электромагнитный момент с моментом, необходимым для ускорения вращающихся масс, получим уравнение для скольжения ротора во время разгона

$$-T_{кр} \cdot \frac{ds}{dt} = \frac{2}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}, \quad (13)$$

которое интегрируется методом разделения переменных

$$dt = -\frac{T_{кр}}{2} \cdot \left(\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s} \right) \cdot ds, \quad (14)$$

и тогда время разгона представляется выражением

$$t = -\frac{T_{кр}}{2} \cdot \int \left(\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s} \right) ds, \quad (15)$$

в пределах изменения скольжения от $s=1$ до s , соответствующему времени разгона. Подставляя значения пределов, находим время разгона, равное:

$$t_p = T_{кр} \cdot \left[\frac{1-s^2}{4 \cdot s_{кр}} + \frac{s_{кр} \cdot \ln(1/s)}{2} \right]. \quad (16)$$

Время разгона равно произведению критической постоянной времени, измеряемой в секундах, и относительного времени (выражение в квадратных скобках), характеризующего постепенное возрастание времени разгона.

Анализ показывает, что время разгона нарастает по довольно сложному закону по мере уменьшения скольжения, т. е. увеличения скорости, и связано с интенсивностью процесса пуска.

Так как уравнение для времени разгона t_p является трансцендентным относительно скольжения, то его нельзя решить в общем виде, и поэтому невозможно выразить скорость в виде явной функции от времени.

2. ОСНОВНОЙ РЕЗУЛЬТАТ

Однако для конкретной задачи можно определить время разгона или рассчитать численно зависимости скольжения (и относительной угловой скорости) от относительного времени разгона $t/T_{кр}$ и получить семейство при различных значениях критического скольжения, зависящего от активного сопротивления роторной обмотки [1].

Можно построить зависимости относительной угловой скорости ω/ω_0 от относительного времени разгона $t/T_{кр}$ (рис. 1–3).

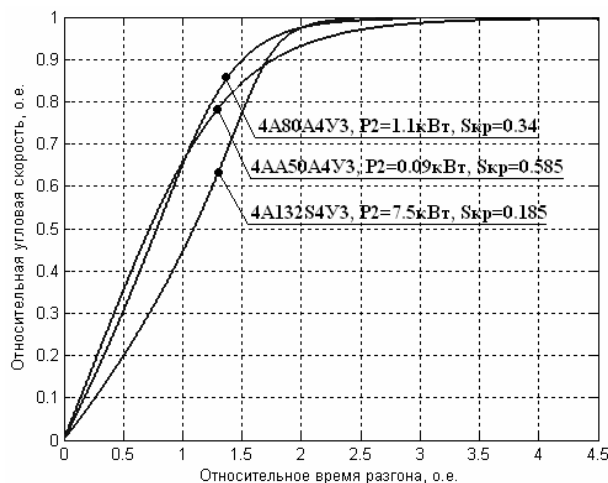


Рис. 1. Зависимость относительной угловой скорости АД малой мощности от относительного времени разгона

Как видно на рис. 1, самый интенсивный рост скорости при пуске имеет маломощный двигатель со свойственным ему высоким пусковым моментом по причине большого активного сопротивления обмоток статора [2]. Однако крутизна характеристики такого двигателя заметно ослабляется при достижении скорости, близкой к критической, и номинальной скорости вращения он достигает последним в своем мощностном классе. Номинальная мощность двигателя, как правило, имеет обратную пропорциональность с величиной критического скольжения [2].

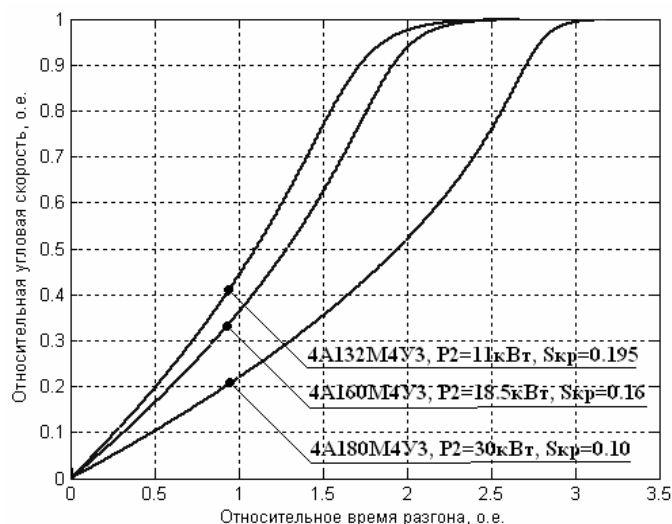


Рис. 2. Зависимость относительной угловой скорости АД средней мощности от относительного времени разгона

У двигателей среднего класса мощностей (рис. 2) уже наблюдается неуклонный рост времени разгона в зависимости от значений критического скольжения. Наибольшая потеря времени происходит теперь на скорости, меньшей критической.

Двигатели класса больших мощностей (рис. 3) имеют очень малые критические скольжения, но при этом столь же малые пусковые моменты, что отражается на времени разгона двигателя.

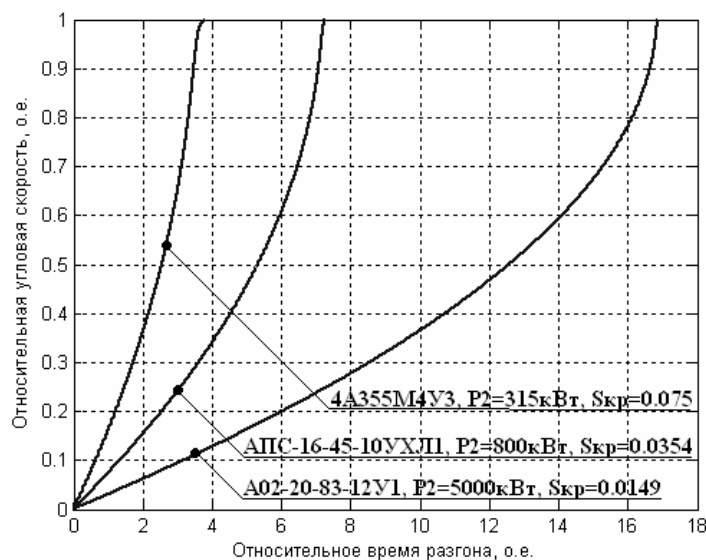


Рис. 3. Зависимость относительной угловой скорости АД большой мощности от относительного времени разгона

Общий вывод таков, что как очень малые, так и очень большие значения критического скольжения затягивают время разгона двигателя. Быстрый разгон имеет место только при критических скольжениях в определенных пределах.

При практическом определении времени разгона концом процесса следует считать момент, когда угловая скорость достигнет значений, близких к синхронной скорости, т. е. когда скольжение становится равным, например, номинальному s_H .

Для режима торможения путем изменения направления вращения магнитного поля (противовключение) выражение

$$t = \frac{T_{кр}}{2} \cdot \int \left(\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s} \right) ds, \quad (17)$$

в пределах изменения скольжения от $s = -1$ до $s = 2$, соответствует времени реверсирования. После подстановки пределов получим

$$t_{рев} = T_{кр} \cdot \left[\frac{4 - s^2}{4 \cdot s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{2 \cdot \ln(2/s)} \right]. \quad (18)$$

Зависимости относительного времени реверсирования от величины критического скольжения при различных значениях скольжения в конце процесса реверсирования, также получают для конкретной задачи или рассчитываются численно.

Критическое скольжение большинства асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором лежит в пределах от 10 % до 20 %. Используя соотношения для времени разгона и реверсирования, можно получить зависимости относительного времени разгона $t/T_{кр}$ от величины критического скольжения при различных конечных величинах скольжения. Эти зависимости имеют выраженный минимум – минимальное время разгона при $s_{кр} = (40...50)\%$ и реверсирования при $s_{кр} = (60...80)\%$. Предельное минимальное время может быть достигнуто, когда в течение всего времени разгона и реверсирования развивается максимальный электромагнитный момент.

Так как процесс реверсирования распадается на два этапа – торможение и разгон в обратную сторону, то время, затрачиваемое на процесс, равно сумме времен торможения и разгона. Эта сумма должна быть минимальной для приводов, где двигатели пускаются в ход из состояния покоя и разгоняются до полной скорости, а затем тормозятся до полной остановки путем изменения направления вращения магнитного поля. Поэтому и в этом случае желательно иметь большую величину критического скольжения. Могут быть рассчитаны и построены графики зависимостей времени разгона и торможения от критического скольжения для реального индукционного двигателя.

Время торможения можно также определить при помощи уравнения, для скольжения ротора проинтегрировав его в пределах от $s = 2$ до $s = 1$. В результате

$$t_T = T_{кр} \cdot \left(\frac{3}{4} \cdot s_{кр} + \frac{1}{2} \cdot s_{кр} \cdot \ln(2) \right). \quad (19)$$

Минимум относительного времени торможения достигается при величинах критического скольжения, которое примерно вдвое больше минимального времени при реверсировании.

Значения критического скольжения и критической постоянной времени, определенные по формулам

$$s = \frac{r_2 \cdot I_{к2}}{E_2} \quad (20)$$

и

$$T_{кр} = T_a \cdot \frac{M_n}{M_{кр}}, \quad (21)$$

где $T_a = J \cdot \omega_n / M_n$, показывают, что асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, от которых требуется быстрое изменение направления и скорости, должны иметь сопротивления обмоток ротора относительно больших величин для сокращения переходных процессов при коммутациях. Кроме того, увеличение максимального электромагнитного момента и уменьшение синхронной угловой скорости приводит к снижению времени разгона и торможения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Принимаемые при расчетах пусковых процессов допущения зависят исключительно от скорости вращения (интенсивности процессов разгона и торможения) и не зависят от других переменных величин.

2. Учет принятых допущений позволяет определить связь моментов, скольжений и длительности разгона и торможения и связать с интенсивностью процесса пуска.

3. Как очень малые, так и очень большие значения критического скольжения затягивают время разгона двигателя. Быстрый разгон имеет место только при критических скольжениях в определенных пределах.

4. Расчетные величины, полученные при анализе процесса пуска, могут служить ориентирами в более детальных исследованиях. На этапе проектирования, определив величины максимального момента и критического скольжения, можно оценить интенсивность разгона и быстродействие асинхронного двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рюденберг Р. Переходные процессы в электроэнергетических системах. – М.: ИЛ, 1955. – 714 с.
2. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
3. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
4. Проектирование электрических машин / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2005. – 767 с.
5. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
6. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Ч. 2. – Л.: Энергия, 1973. – 648 с.
7. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
8. Туровский Я. Техническая электродинамика. – М.: Энергия, 1974. – 488 с.
9. Замчалкин А.С., Тюков В.А. Численное моделирование процесса пуска асинхронного двигателя // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 1 (25), ч. 1. – С. 171–177.
10. Тюков В.А. О влиянии различных параметров на процесс пуска индукционных двигателей // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2013. – № 6. – С. 32–36.

Тюков Валентин Андреевич, доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – электромеханическое преобразование энергии. Имеет более 120 публикаций. E-mail: tyukov@em.power.nstu.ru

Лавренов Евгений Олегович, аспирант кафедры электромеханики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – асинхронные электродвигатели. Имеет более 7 публикаций. E-mail: L.Evgen17@gmail.com

Estimate of the acceleration and braking processes intensity of induction motor at design stage*

V.A. TYUKOV¹, E.O. LAVRENOV²

¹ Novosibirsk state technical University, 20 prospect Karla Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, doctor of technical Sciences, Professor, e-mail: tyukov@em.power.nstu.ru

² Novosibirsk state technical University, 20 prospect Karla Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, post-graduate student of the Department of electrical engineering, e-mail: L.Evgen17@gmail.com

At research process, it is very often deal with necessarily of simplification of the object under consideration, that realize by entering of an assumption. Analysis of the starting and braking processes of induction motors shows that an assumptions which taking into account at calculations do not adequately reflect the physical process of acceleration, because in this way does not include the effect of some variables on acceleration intensity. In some regimes, it leads to significant quantitative and qualitative deviations of calculated dynamic and static characteristics of electrical machine from those taken place in real. In this paper the design parameters of the induction motor influence on the critical slip and, consequently, the acceleration process are considered. Basic design equations in relative units for finding acceleration and braking time from the critical and nominal slip are shown. The relative rotating speed depending on time for various designs of small, medium and large induction motors are built. Conclusions on the applicability of the assumptions in the calculation of starting processes as well as critical slip and overload capacity effect on the starting time are made. It is noted that at the design stage by defining the value of maximum torque and critical slip, we can estimate the intensity of acceleration and operation speed of the induction motor.

Keywords: induction motor, intensity of the starting process, maximum torque, critical slip, time constant, overload capacity, acceleration, braking, reverse braking

REFERENCES

1. Rūdenberg R. *Transient performance of electric power systems* First ed. New York, Toronto, London, McGraw-Hill 1950. 832 p. (Russ. ed.: Ryudenberg R. Perekhodnye protsessy v elektroenergeticheskikh sistemakh. Moscow: IL Publ., 1955. 714 p.).
2. Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolenskaya E.A. *Asinkhronnye dvigateli serii 4A. Spravochnik* [Induction machines series 4A. Handbook]. Moscow: Energoizdat Publ., 1982. 504 p.
3. Vol'dek A.I. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Leningrad, Energiia Publ., 1978. 832 p.
4. Kopylov I.P., Klokov B.K., Morozkin V.P., Tokarev B.F., Kopylov I.P., ed. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Electrical machines design]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2005. 767 p.
5. Kovach K.P., Rats I. *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transient processes in AC electrical machines]. Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1963. 744 p.
6. Kostenko M.P., Piotrovskii L.M. *Elektricheskie mashiny. Ch. 2.* [Electrical machines. Pt. 2]. Leningrad, Energiia Publ., 1973. 648 p.
7. Kopylov I.P. *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin* [Electrical machines mathematical modeling]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001. 327 p.
8. Turovskij J. *Tekhnicheskaya elektrodinamika* [Technical electrodynamics]. Moscow: Energiia Publ., 1974. 488 p.
9. Zamchalkin A.S., Tyukov V.A. *Chislennoe modelirovanie protsessa puska asinkhronnogo dvigatelia* [Numerical modeling of process of start-up of the induction motor]. *Doklady TUSUR – Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2012, no. 1 (25), pt. 1, pp. 171-177.
10. Tyukov V.A. *O vlianii razlichnykh parametrov na protsess puska induktsionnykh dvigatelei* [Induction motor start process influenced by diverse parameters]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2013, no. 6, pp. 32-36.

ISSN 1814-1196, <http://journals.nstu.ru/vestnik>
Scientific Bulletin of NSTU
Vol. 56, No. 3, 2014, pp. 151–159

* Received 07 March 2014.