

УДК 621.313.333

Ж.Ю. Слепушкина, ст. преподаватель,**Б.П. Береза, канд. техн. наук,****А.М. Олейников, профессор, д-р техн. наук***Севастопольский национальный технический университет**Ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua***ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ПУСКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО СПРАВОЧНЫМ ДАННЫМ**

Исследованы динамические свойства электропривода при пуске. Приведены соотношения для расчета времени пуска АД холостую и под нагрузкой в зависимости от характеристик момента сопротивления механизма, а также при изменении параметров питающей сети.

При пуске асинхронных двигателей необходимо выполнение следующих требований: процесс пуска должен быть «мягкий», осуществляться без сложных пусковых устройств, пусковой момент должен быть больше момента статического $M_{ст}$, а пусковые токи – малыми, время пуска не должно превышать допустимых значений. Иногда к этим требованиям добавляются другие, обусловленные особенностями работы в каждом конкретном приводе.

Для эксплуатации электропривода очень важно предусмотреть поведение электродвигателя во время пуска под нагрузкой и без нагрузки, при торможениях, перерывах питания и др. В любом из этих случаев для предотвращения аварийных ситуаций необходимо знать время пуска, имея каталожные данные используемого двигателя, и сведения о его нагрузке.

Цель статьи – исследование поведения электроприводов, содержащих асинхронные электродвигатели во время нестационарных режимов работы, в частности при пуске, а также при изменениях параметров питающей сети.

Динамические свойства электропривода с асинхронным электродвигателем описываются уравнением

$$M = M_{ст} \pm M_{дин}, \quad (1)$$

где $M_{дин} = J \frac{d\Omega}{dt}$ – динамический момент системы асинхронный двигатель – исполнительный механизм; J – момент инерции; M – вращающий электромагнитный момент; $M_{ст}$ – момент сопротивления исполнительного механизма. А время разгона может быть записано в виде

$$t = J \int_0^{\Omega_1} \frac{d\Omega}{M - M_{ст}}. \quad (2)$$

Если перейти к относительным значениям составляющих выражения (2), то формула для времени пуска приобретет вид

$$t_n = -T_J \int_{s_1}^{s_2} \frac{ds}{m_{дин}}, \quad (3)$$

где s – скольжение, $m_{дин}$ – относительный динамический момент, $T_J \approx J \frac{\Omega_c}{P_n}$ – механическая постоянная времени привода, Ω_c – синхронная угловая скорость вращения электродвигателя.

Точное решение уравнения (3) весьма затруднительно из-за сложного характера изменения момента во время пуска. Если воспользоваться зависимостью вращающего момента от скольжения в виде равенства Клосса

$$\frac{M}{M_{кр}} = \frac{2}{\frac{s_{кр}}{s} + \frac{s}{s_{кр}}}, \quad (4)$$

то получается следующее выражение для времени пуска двигателя холостую

$$t_n = -\frac{T_J}{2} \int_1^{s_1} \left(\frac{s_{кр}}{s} + \frac{s}{s_{кр}} \right) ds = -\frac{T_J}{2} \left(\frac{s^2}{2s_{кр}} + s_{кр} \ln s \right) \Big|_1^{s_1} = T_J \left[\frac{1-s_1^2}{4s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{1} \ln \frac{1}{s_1} \right]. \quad (5)$$

В соотношении (5) $s_{кр}$ и T_J могут быть найдены с использованием справочных данных, а сама формула может быть применена для качественного анализа процесса пуска. Однако из-за приближенного характера формулы Клосса и результаты расчета будут приближенными.

Зависимости относительной скорости ($1-s$) от относительного значения времени пуска t/T_J при различных значениях критического скольжения $s_{кр}$, построенные по (5) показаны на рисунке 1 [1].

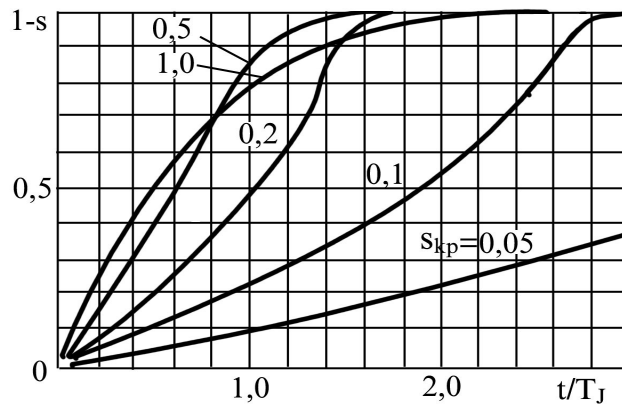


Рисунок 1 – Зависимости нарастания относительной скорости АД от относительного времени пуска

Из рисунка 1 видно, что скорость пуска быстро повышается, при критических скольжениях, близких к единице, кривые разгона имеют экспоненциальный характер, а при малых – асимптотически приближаются к установившемуся значению. Соответственно время пуска тем меньше, чем больше значение $s_{кр}$.

Истинный характер процесса разгона АД показан на рисунке 2 [2].

Как видно из рисунка, разгон вхолостую происходит за $t_{n0}=0,34$ с, в то время как расчет по формуле (5) дает $t_{n0}=0,315$ с. Результаты расчета и эксперимента близки, но не совпадают.

В работе [2] продолжительность пуска вхолостую рассчитывается по соотношению

$$t_{n0} = \frac{T_J}{K_{мк}} \left(\frac{1-s_0^2}{4s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{2} \cdot \ln \frac{1}{s_0} \right), \quad (6)$$

где $K_{мк} = M_m/M_n$ – кратность максимального момента.

Подобное соотношение для расчета времени пуска приведено в [3] в виде:

$$t_n = J \frac{\Omega_0}{2M_k} \left[\frac{(K_q K_{мк} + K_{мн})(1-s_{кр})}{K_q \cdot K_{мк} \cdot K_{мн}} - \frac{(2K_{мк} K_q + 1)(s_{кр} - s_n)}{2K_{мк} \cdot K_q} \right]. \quad (7)$$

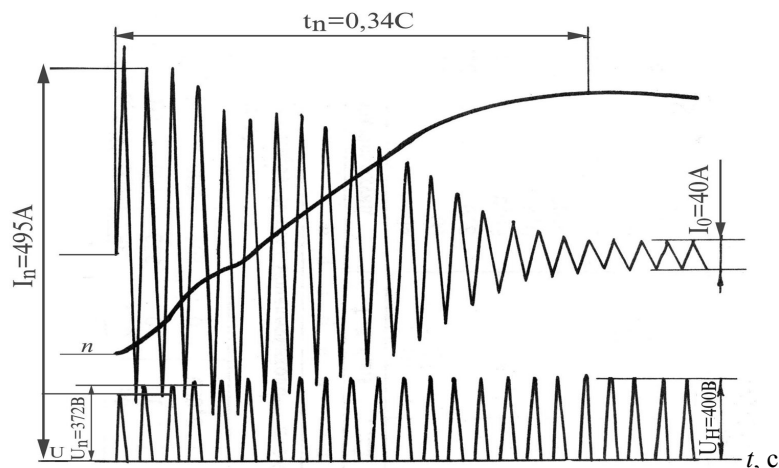


Рисунок 2 – Пуск АД 4AC225 – М4 в холостом режиме

Здесь $K_{мн}$ – кратность пускового момента, $s_{кр}$ – критическое скольжение, s_n – номинальное скольжение $K_q = M_{дин}/M_c$ – коэффициент динамичности, учитывающий отличие динамической механической характеристики от статической (в практических расчетах $K_q \approx 0,75 \dots 1,0$).

Расчеты, проведенные по соотношениям (6) и (7), расходятся с данными эксперимента на 15...50 %, а сами соотношения имеют ряд параметров, относящихся к статическим характеристикам, и отличаются большой неопределенностью, если рассматривать истинный характер изменения вращающего момента во время пуска.

Проанализировав соотношения (6) и (7), определяющие время пуска АД без нагрузки, можно заметить, что механическая постоянная времени T_J достаточно точно отражает время разгона двигателя без нагрузки, т.е.

$$T_J = \frac{GD_{прив}^2 2\pi\pi_c}{4 \cdot 60 \cdot M_n} = J \frac{\Omega_c}{M_n} \approx J \frac{\Omega_c^2}{P_n} . \quad (8)$$

Выражение (8) включает все доступные параметры двигателя, а при расчетах для АД разных мощностей оно дает более близкие к экспериментальным данным результаты, чем результаты расчета по выражению (7).

Для практического применения необходимо иметь возможность определять не только время пуска АД вхолостую, но и в зависимости от характера и величины момента сопротивления на валу.

В [3] время пуска для этих условий рекомендуется определять по формуле

$$t_n = t_{n0} \frac{F_i}{K_m} , \quad (9)$$

где K_m – коэффициент момента, t_{n0} – длительность пуска двигателя вхолостую, при отсутствии статического и динамического моментов сопротивления на валу.

В (9) F_i – обобщенный коэффициент инерции,

$$F_i = \frac{J_{\partial p} + J_{\partial m}}{J_{\partial p}} ,$$

где $J_{\partial p}$ – момент инерции двигателя, $J_{\partial m}$ – приведенный к валу АД динамический момент инерции механизма, и в каждом конкретном случае необходимо знать данные исполнительного механизма. Величина коэффициента момента K_m зависит от характера момента сопротивления $m_c = f(n/n_c)$ и вращающего момента АД M .

Эмпирические значения коэффициента K_m для серий двигателей 4А, 4АН, 4АР, 4АС с учетом характера момента сопротивления для широкого диапазона скоростей вращения и мощностей изображены на рисунке 3 [4].

Как видно из рисунка 3, коэффициент K_m действительно изменяется в широких пределах при разных моментах сопротивления: при $m_c = 1 = \text{const}$ K_m лежит в диапазоне от 0,2 до 0,5; при квадратичном моменте сопротивления ($m_c \approx n^2$) для АД всех серий коэффициент момента укладывается в узком диапазоне

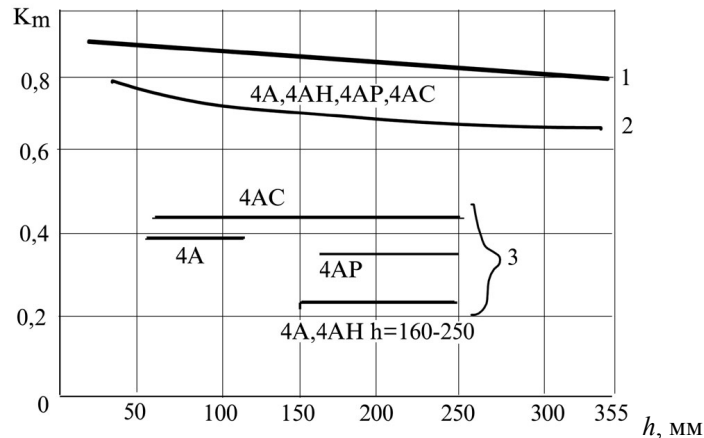


Рисунок 3 – Зависимости коэффициента K_m от высоты оси вращения АД при различном характере момента сопротивления исполнительного механизма:

1) ; 2) ; 3) $m_c = 1$

$K_m = 0,8 \dots 0,9$. Такая же закономерность, но при меньших значениях ($K_m = 0,65 \dots 0,80$) наблюдается и для случая линейной зависимости момента сопротивления $m_c \approx n$.

Исключительно важной задачей расчетов является учет влияния параметров питающей сети. Если заменить коэффициент момента в соотношении (9) на избыточный момент при номинальном напряжении, а время пуска вхолостую – на механическую постоянную времени T_J , то время пуска под нагрузкой запишется в виде [4]

$$t_{nn} = \frac{T_J F_i}{m_{nn} - m_c} , \quad (10)$$

где m_{nn} и m_c – относительные значения момента пускового при номинальном напряжении и момента сопротивления соответственно.

Момент вращения, в том числе и пусковой, зависит, как правило, от квадрата питающего напряжения, тогда время разгона при произвольном напряжении может быть рассчитано по формуле

$$t_{nn} = \frac{T_J F_i}{u^2 \cdot m_{nn} - m_c}, \quad (11)$$

а относительное изменение времени разгона определяется соотношением

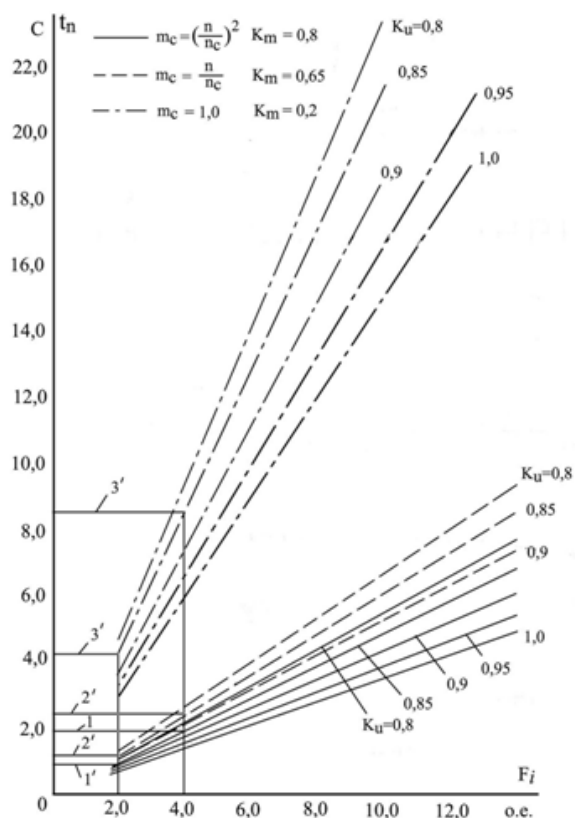
$$t_{omnH} = \frac{t_{nv}}{t_{nn}} = \frac{m_{nn} - m_c}{u^2 m_{nn} - m_c}. \quad (12)$$

Из (12) видно, что при всех прочих равных условиях время пуска существенно увеличивается при понижении напряжения питающей сети.

Например, если $m_{nn} = 2$, а $m_c = m_n = 1$, то получается: $t_{omn} = 1,61$ при $u = 0,9$; $t_{omn} = 3,57$ при $u = 0,8$; $t_{omn} = 8$ при $u = 0,75$.

Таким образом, снижение напряжения при пуске на 25 % увеличивает время разгона при постоянном моменте сопротивления на валу в 8 раз.

На рисунке 4 показаны зависимости времени пуска асинхронного двигателя 4А250-М4У3 мощностью $P_n = 90$ кВт под нагрузкой для широкого диапазона изменения коэффициента инерции F_i при реальных



значениях коэффициента момента K_m и для типичных характеристик момента сопротивления механизма m_c

Как видно из рисунка 4, зависимость времени пуска от коэффициента инерции носит линейный характер, угол наклона характеристик t_n зависит от характера момента сопротивления: чем больше момент сопротивления, тем в большей степени изменяется время пуска при изменении питающего напряжения.

Рисунок 4 – Зависимость времени пуска асинхронного двигателя 4А250-М4У3 под нагрузкой от момента инерции и момента сопротивления при изменении напряжения сети. В заключении можно отметить, что на пуск АД и его продолжительность оказывает влияние множество факторов: параметры двигателя, характеристики производственного механизма, состояние питающей сети. Характер протекания процесса пуска аналогичен для АД любых габаритов, мощностей и скоростей вращения. Это дает право использовать общие соотношения для расчетов времени разгона вхолостую и под нагрузкой. Для расчета времени пуска двигателя вхолостую вполне может быть использовано соотношение (8), выражение (11) позволяет определить время разгона АД под нагрузкой и одновременно учесть реальное напряжение питающей сети. Соотношения (8) и (11) вполне отражают суть процесса пуска и, используя их, можно произвести расчеты, имея каталожные данные двигателя и исполнительного механизма.

Перспективой дальнейших исследований будет уточнение полученных выражений для определения времени пуска АД. Так как изменения момента вращения во время пуска имеет весьма сложный характер, то необходимо получить более строгую зависимость вращающего момента от скольжения, от схемы замещения, а также напряжения и частоты питающей сети.

Библиографический список

1. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе / М.М. Соколов [и др.]. — М.: Энергия, 1967. — 207 с.
2. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей / И.А. Сыромятников. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. — 528 с.
3. Гандин Б.Д. Пуск асинхронных двигателей / Б.Д. Гандин, Г.Р. Гревин, Н.А. Лазаревский. — Л.: Судостроение, 1980. — 153 с.
4. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболевская. — М.: Энергия, 1967. — 207 с.

Поступила в редакцию 21.01.2008 г.