

УДК 621.3.016.34

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ТРОГАНИИ*

О. А. Хребтова, В. В. Ченчевой, В. А. Огарь

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: 34092@ukr.net

Рассмотрен способ определения параметров питающей сети для частотно-регулируемого асинхронного электропривода в условиях тяжелого пуска и трогания. Установлено, что применение регрессионной модели, отображающей полиномиальную зависимость пускового момента и тока от амплитуды и частоты напряжения питающей сети, позволяет получить максимально допустимый пусковой момент при минимальном пусковом токе с учетом кривой намагничивания для технологических механизмов в условиях тяжелого трогания и пуска. Регрессионная модель получена методом планирования эксперимента, входные параметры которого определялись на базе математической модели асинхронного двигателя в трехфазной системе координат. Для аппроксимации кривой намагничивания по экспериментальным данным авторами предложено использовать функцию Локон (Верзьера) Аньези, которая отображает реальные процессы в области низких частот питания.

Ключевые слова: частотно-регулируемый электропривод, тяжелые условия трогания и пуска, кривая намагничивания, математическая модель, гипотетический метод, регрессионная математическая модель.

ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ПРИ РУШАННІ*

О. А. Хребтова, В. В. Ченчевой, В. О. Огарь

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: 34092@ukr.net

Розглянуто спосіб визначення параметрів мережі живлення для частотно-регульованого асинхронного електроприводу в умовах важкого пуску й рушання. Установлено, що застосування регресійної моделі, яка відображає поліноміальну залежність пускового моменту й струму від амплітуди та частоти напруги мережі живлення, дозволяє отримати максимально допустимий пусковий момент при мінімальному пусковому струмі з урахуванням кривої намагнічування для технологічних механізмів в умовах важкого рушання й пуску. Регресійну модель отримано методом планування експерименту, вхідні параметри якого визначалися на базі математичної моделі асинхронного двигуна в трифазній системі координат. Для апроксимації кривої намагнічування за експериментальними даними авторами запропоновано використовувати функцію Локон (Верз'єра) Аньєзі, яка відображає реальні процеси в області низьких частот напруги живлення.

Ключові слова: частотно-регульований електропривод, важкі умови рушання й пуску, крива намагнічування, математична модель, гіпотетичний метод, регресійна математична модель.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Несмотря на широкий спектр современной силовой и микропроцессорной техники, достижения теории автоматического управления и расширение систем электроприводов, в настоящее время остро стоит вопрос о регулировании параметров электроприводов, реализации алгоритмов предстартовой подготовки для механизмов с тяжелыми условиями трогания и пуска. Многообразие возможных способов [1, 2] предстартовой подготовки средствами электропривода требует нахождения оптимальных алгоритмов управляемого трогания, позволяющих при минимальных затратах энергии достичь наиболее благоприятных пусковых условий, т.е. решить задачу продления ресурса электротехнического и технологического оборудования.

В работах [1, 2] обосновано применение систем управляемого трогания на базе преобразователя частоты (ПЧ), которые позволяют:

- совершать как однонаправленные, так и колебательные движения ротора с плавным нарастанием частоты вращения и амплитуды электромагнитного момента асинхронного двигателя (АД);
- выбирать частоты колебаний и спектральный состав момента асинхронного двигателя для наиболее

эффективного преодоления повышенного момента сопротивления при трогании;

- удерживать рабочий орган в заданном положении с целью выполнения подготовительных предстартовых или наладочных операций.

Однако не все возможности системы управляемого трогания на базе ПЧ–АД применимы для некоторых технологических механизмов (конвейерных линий, подъемно-транспортных механизмов).

Организация предстартовой подготовки за счет простейших законов частотного управления позволяет не только повышать пусковое значение момента АД, но и обеспечивать требуемую интенсивность его увеличения. За счет изменения соотношения амплитуды и частоты питающего напряжения $k_U = (k_f)^{1/\beta}$, где $k_f = f_1 / f_{1nom}$ – коэффициент, учитывающий снижение частоты f_1 основной гармоники напряжения по отношению к номинальной частоте сети f_{1nom} ; $k_U = U_1 / U_{1noo}$ – напряжение на статоре U_1 , выраженное в долях к номинальному U_{1nom} ; β – коэффициент, определяющий величину момента АД и изменяющийся в диапазоне $\beta = 1...k$

*Работа выполнена под руководством проф., д.т.н. Родькина Д.Й.

по закону $\beta_n = \beta + 0,1n$, где n – номер попытки трогания; k – количество попыток трогания. Таким образом, пусковой момент $M_{П}$ повышается на значение $\Delta M_{П}$ и интенсивность возрастания формируется по закону $M_{Пn} = M_{Пn-1} + \Delta M_{П}$.

Для основных законов частотного управления характерны следующие допущения: напряжение симметричное и синусоидальное; характеристика намагничивания двигателя линейная или кусочно-линейная ($X_{\mu} = const$ при регулировании Ψ в небольших пределах); эффект вытеснения тока отсутствует; активное сопротивление цепи намагничивания принимается равным нулю $R_{\mu} = 0$ [3]. В результате полученные законы не учитывают изменение электромагнитных параметров асинхронной машины (АМ) при снижении частоты питающего напряжения и, как следствие, выбранные параметры управления при работе на пониженной частоте неэффективны.

Другим недостатком приведенного выше метода выполнения пуска и трогания является наличие значительных пусковых токов, хоть и ограниченных частотными средствами управления, но существенных при пониженной частоте питающего напряжения и достаточно продолжительном времени трогания и пуска.

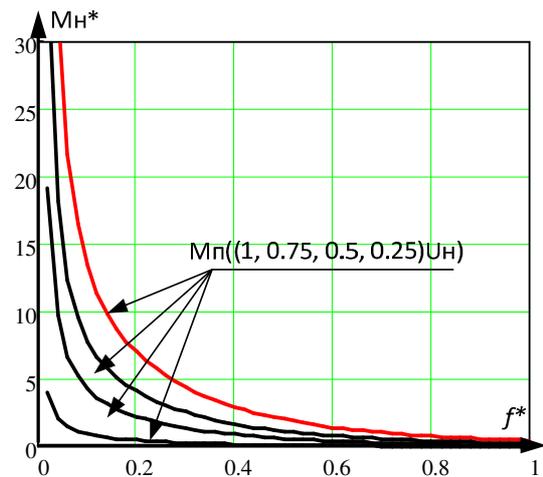
Работа на пониженной частоте определяет существенное падение напряжения на активном сопротивлении статора, что оказывает влияние на характеристики двигателя, увеличиваются потери в меди статора и ротора, потери в стали статора от гистерезиса и вихревых токов. Для системы ПЧ–АД в установившихся режимах при абсолютном скольжении, не превышающем номинальное, основными потерями в стали ротора пренебрегают, т.к. они «исчезающе малы» [3].

В работах [4, 5] обоснована необходимость учета влияния насыщения стали магнитопровода и вытеснения тока в обмотке ротора для уменьшения погрешности определения параметров регулируемых электроприводов с тяжелыми условиями трогания и пуска, работающих в широких диапазонах изменения частоты вращения. Для этого необходимо на основании экспериментальных или справочных данных определять кривую намагничивания АД.

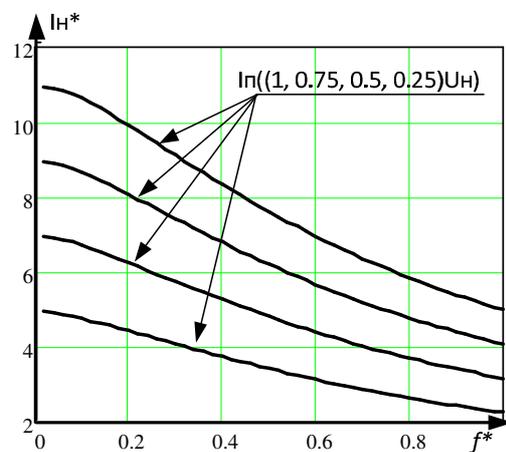
Вопросами рациональности работы асинхронного двигателя при частотном управлении с условием создания постоянной перегрузочной способности двигателя при пуске в функции тока рассматривались проф. Г.И. Штурманом. В результате исследований определены зависимости математических уравнений электрических и электромеханических характеристик в зависимости от параметров питающего напряжения. Для определения зависимостей в общее выражение момента машины вводились ко-

эффициенты, характеризующие изменение параметров АД от частоты f_1 [6].

В работе проф. Г.И. Штурмана отмечено, что реализация тех же моментов при меньших силах тока связана с особенностью количественных соотношений параметров АД, которая явно проявляется вблизи границы перехода машины из синхронного режима в асинхронный. Рассмотрены режим динамического торможения как частный случай частотного управления и работа асинхронного двигателя в зоне пониженной частоты с более полным учетом параметров цепи намагничивания.



а)



б)

Рисунок 1 – Семейство характеристик асинхронного двигателя при изменении параметров питающей сети: а) пусковой момент; б) пусковой ток

Пусковой момент, превышающий номинальный в несколько раз, можно получить в области низких частот при значительном напряжении (рис. 1,а), однако при этом возрастает пусковой ток (рис. 1,б).

На графиках приняты обозначения в относительных единицах, где $M_n^* = M_n / M_{nom}$; $f^* = f_1 / f_{1nom}$; $I_n^* = I_n / I_{nom}$. Известно, что при пятикратном пусковом токе на активном сопротивлении обмотки статора выделяется тепловая мощность, в 25 раз большая, чем при I_{nom} . При тяжелых условиях пуска, когда $M_n \gg M_{nom}$, возникает опасность перегрева обмоток двигателя, что вызывает нарушение целостности изоляции обмоток ротора и, как следствие, большую вероятность возникновения аварийных ситуаций, в частности, короткое замыкание. При выполнении трогания и пуска асинхронного двигателя под нагрузкой встал вопрос о возможности создания пускового момента при минимальном пусковом токе в цепи статора подбором соответствующего соотношения напряжения и частоты питающей сети.

В связи с этим целью работы является определение зависимости частоты и напряжения асинхронного двигателя для формирования максимального значения пускового момента $M_n \rightarrow max$ с минимальным пусковым током в цепи статора $I_n \rightarrow min$.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Для определения закономерностей влияния параметров питающего напряжения на пусковые характеристики АД использовали метод планирования эксперимента, входные параметры которого определялись на базе математической модели АД в трехфазной системе координат.

С целью минимизации числа проводимых опытов при исследованиях применялась методика математического планирования эксперимента по схеме рототабельного централизованного композиционного планирования, в основе которой лежит регрессионный анализ, включающий метод наименьших квадратов и статистическую обработку данных. Такой подход позволяет построить модель, с одинаковой точностью предсказывающую значение отклика, пускового момента (M_n) и пускового тока (I_n) в точках, равноудаленных от центра плана, и с наибольшей точностью в точках, расположенных в его окрестности. Эти свойства модели являются эффективными для случаев, когда исследуется функционирование объекта вблизи номинального режима, а также когда модель предполагается использовать для оптимизации исследуемого процесса при условии, что искомым оптимум находится недалеко от центра плана. Реализация такого исследования наилучшим образом подходит для обработки результатов, полученных с помощью математической модели.

Основной целью проведения планирования эксперимента является определение математического уравнения, которое будет отображать зависимость пускового момента и пускового тока от параметров питающего напряжения. Соотношение тока и на-

пряжения не связано каким-либо законом частотного управления и может меняться в зависимости от области варьирования исходных параметров $U_c / f_1 = var$.

При планировании эксперимента необходимо выбрать критерий оптимизации – параметр, по которому оценивается исследуемый объект и который связывает факторы в математическую модель. При выборе критерия оптимизации необходимо стремиться к тому, чтобы он был один, имел четкий физический смысл и количественную оценку. При исследовании пусковых процессов в качестве основного критерия оптимизации принята величина I_n , поэтому при определении максимально возможного значения пускового момента выбираются такие значения f_1 и U_c , при которых пусковой ток будет иметь максимально малое значение, т.е. $I_n \rightarrow min$ [7].

При статическом подходе математическая модель объекта или процесса представляется в виде полинома, т.е. отрезка ряда Тейлора, в который разлагается неизвестная функция, которая имеет вид:

$$y(x_1, \dots, x_k) = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{\substack{i,j,u=1 \\ i \neq j \neq u}}^k b_{iju} x_i x_j x_u + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \dots \quad (1)$$

где b_0 – свободный член; b_i – линейные эффекты; b_{ij} – эффекты парного взаимодействия; b_{ii} – квадратичные эффекты; b_{iju} – эффекты тройного взаимодействия.

Факторами воздействия будут частота (f_1) и амплитуда питающего напряжения (U_c). Диапазон исследований определяем в области средних и низких частот с учетом [3]. Для учета реальных физических процессов, проходящих в асинхронной машине, предложено использовать математическую модель АД с учетом эффекта насыщения магнитной цепи, эффекта вытеснения тока в роторе и потерь в стали [4, 5].

В работах [8–11] рассмотрены основные способы представления математической модели асинхронного двигателя, которые описывают физические процессы, протекающие в исследуемой машине.

Основными требованиями к динамической модели АД являются: адекватность отображения реального объекта рабочих диапазонов изменения всех её переменных; наличие минимального количества дифференциальных уравнений; все параметры модели должны быть выражены постоянными значениями или функциями одной из переменных состояния; количество параметров модели, которые изменяются в зависимости от режима работы двигателя, должно быть минималь-

но; алгоритм расчета процессов по возможности должен быть линейным (необходимо избегать наличие замкнутых циклов для проведения итераций).

С учетом вышесказанного, для расчета входных параметров проведения эксперимента была выбрана трехфазная модель АД в естественных координатах, которая позволяет учитывать изменения индуктивного сопротивления контура намагничивания от значений тока намагничивания и получать динамические характеристики с учетом потерь в стали.

Так как область исследования по формированию пускового момента в нашем случае лежит в диапазоне низких частот, авторами предложено использовать функцию Локон (Верзьера) Аньези для аппроксимации кривой намагничивания по экспериментальным данным (рис. 2). Представление кривой намагничивания (рис. 2) дает возможности реализации режима самовозбуждения в модели АМ, позволяет учитывать насыщение магнитопровода, для учета которого введена зависимость параметра взаимной индуктивности L_{μ} от тока намагничивания i_{μ} .

Кривая намагничивания может быть аппроксимирована следующим образом [12]:

$$\Psi^*(I_{\mu}^*) = a \operatorname{arctg}(b I_{\mu}^*), \quad (2)$$

где $a = 0,9932814$, $b = 1,4963076$ – коэффициенты аппроксимации.

После преобразований зависимость $L_{\mu}^*(I_{\mu}^*)$ в относительных единицах будет иметь вид:

$$L_{\mu}^*(I_{\mu}^*) = -\frac{d}{dI_{\mu}^*} \Psi^*(I_{\mu}^*) = \frac{ab}{1+(bI_{\mu}^*)^2}. \quad (3)$$

Данная функция имеет название Локона (Верзьера) Аньези.

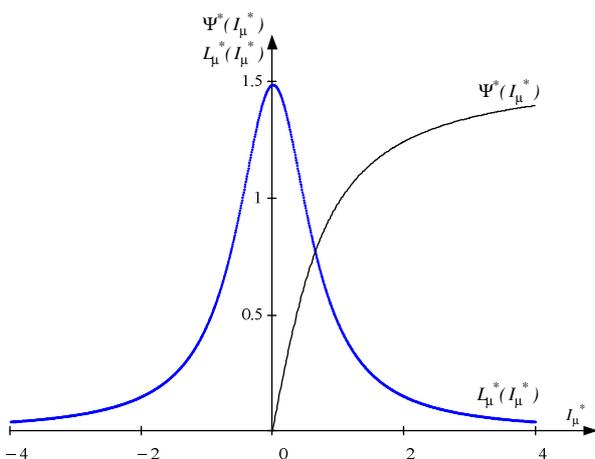


Рисунок 2 – Кривая намагничивания асинхронного двигателя в относительных единицах

Расчет выполнен для электродвигателя серии 4А со следующими параметрами: мощность $P_{ном} = 1,5$ кВт; номинальная скорость – 1276 об/мин; номинальный ток – 3,1 А; КПД – 75 %; коэффициент мощности – 0,71; активное сопротивление ротора – 5,6 Ом; реактивное сопротивление ротора – 6,9 Ом; приведенное активное сопротивление статора – 2,4 Ом; приведенное реактивное сопротивление статора – 6,9 Ом; сопротивление контура намагничивания – 5,6 Ом; перегрузочный коэффициент по току – 5; перегрузочная способность по номинальному моменту – $\lambda_n = 2,2$; перегрузочная способность по пусковому моменту – $\lambda_p = 2$.

В табл. 1 приведены интервалы варьирования факторов регрессионной модели при построении матрицы плана эксперимента. Ошибку эксперимента моделируем как нормально распределенную с параметрами $\sigma^2 = 1,3$. Доверительную вероятность определяем как максимально допустимую $\alpha = 0,05$.

Максимальное значение фактора кодируем в виде +1, минимальное – в виде -1. Интервал варьирования каждого фактора определялся условиями опыта (табл. 1).

Таблица 1 – Интервалы варьирования факторов исследуемой системы

Параметры	Факторы	
	Напряжение сети	Частота сети
1	2	3
Основной уровень, $x_i = 0$	80	2,5
Интервал варьирования	20	0,5
Верхний уровень, $x_i = +1$	120	5
Нижний уровень, $x_i = -1$	20	0
Верхняя звездная точка, $x_i = +1,6$	192	8
Нижняя звездная точка, $x_i = -1,6$	32	0

В экстремальном «эксперименте» полнофакторная матрица состоит из шести столбцов значений факторов и 10 строк (опытов) переборов этих значений. Условия каждого опыта (строки) повторялись три раза. Гипотеза об адекватности модели проверялась по F-критерию [12]. Значимость коэффициентов регрессии оценивалась двумя равноценными способами: построением доверительного интервала и по t-критерию Стьюдента.

Для проведения анализа регрессионная модель представлена в виде графических зависимостей, которые отображают влияние каждого входного

фактора на отклик выходного параметра и распределение оптимумов регрессионной модели (рис. 3).

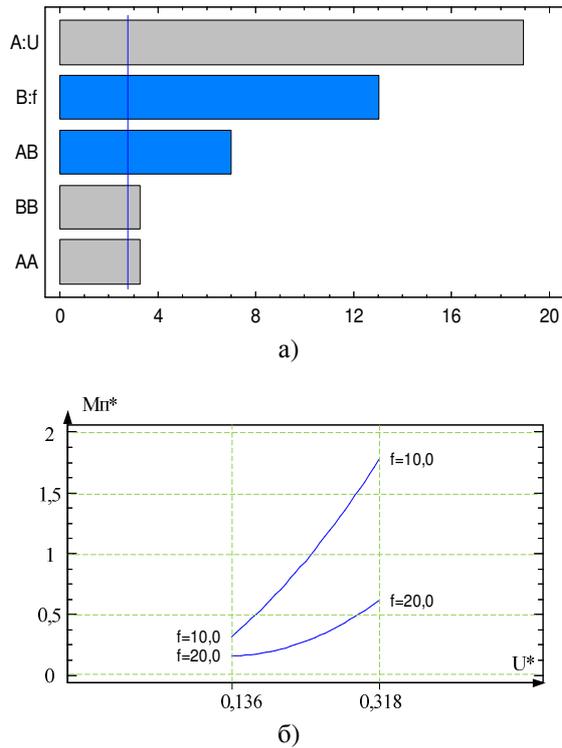


Рисунок 3 – Стандартизованная карта Парето (а) и распределение оптимумов регрессионной модели при изменении входных факторов (б)

Адекватность полученной модели, согласно коэффициенту детерминации R^2 , составляет 99,3282 %. Для того, чтобы была возможность сравнивать модели с разным числом факторов так, чтобы число факторов не влияло на статистику, обычно используется скорректированный коэффициент детерминации, R^2 которого составляет 98,4885 %. Критерий Фишера определяется как $F_{emp} = 1,815$ при $F_{kr} = 3,22$, t-критерий Стьюдента определяется как $t_{emp} = 1,25$ при $t_{kr} = 2,23$. Таким образом, математическая регрессионная модель полностью отображает зависимость пускового момента и тока от изменения частоты и напряжения питающей сети с допустимой точностью.

В результате выполнения математического планирования получаем полиномиальные зависимости пускового тока и пускового момента:

$$M_n(U, f) = a_1 + a_2U + a_3f + a_4U^2 + a_5Uf + a_6f^2, \quad (4)$$

где $a_1 = -0,0406082$, $a_2 = 0,14881$, $a_3 = -0,277744$, $a_4 = 0,0011652$, $a_5 = -0,0111$, $a_6 = 0,0182$ – коэффициенты полиномиальной зависимости (4);

$$I_n(U, f) = b_1 + b_2U + b_3f + b_4U^2 + b_5Uf + b_6f^2, \quad (5)$$

где $b_1 = 0,97918$, $b_2 = 0,162416$, $b_3 = -0,222417$, $b_4 = -0,0006009$, $b_5 = -0,000169881$, $b_6 = 0,00358028$ – коэффициенты полиномиальной зависимости (5).

При наложении на полученные графики номинальных значений момента критического $M_k = 10,5$ (Н·м), пускового тока $I_n = I_{c5} = 15,5$ (А) можно определить диапазон варьирования f_1 и U_c для определения заданного значения $M_n(U, f)$, которое будет задаваться как $M_n = kM_k$, где k – коэффициент перегрузочной способности АД (0,2...2).

Графическое представление поверхностей отклика изображено на рис. 4.

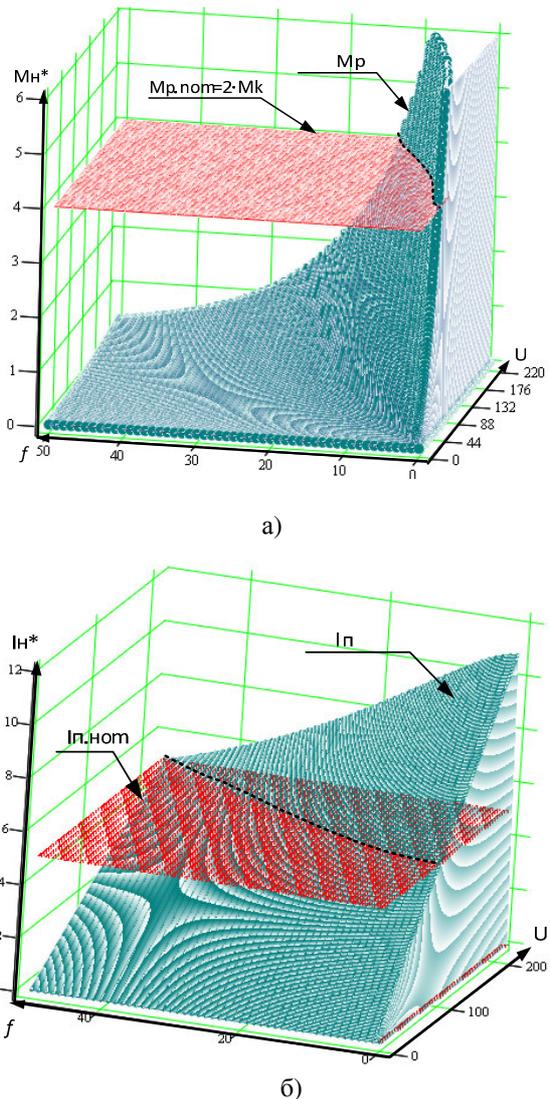


Рисунок 4 – Характеристика пускового момента (а) и тока (б) при проведении математического планирования двухфакторного эксперимента

Из рис. 4 видно, что постоянство пускового момента возможно получить при условии, что напряжение питающей сети не связано линейной

зависимостью с частотой питания U (рис. 5). Зависимость I_n' определяет изменение тока статора при постоянстве момента и $s = F(f_1)$, где в области низких частот определяется точка $I_n \rightarrow m^3 n$. При сохранении условия постоянства пускового момента, который формируется при $s = 1$, зависимости тока статора характеризуются кривой I_n . По полученным уравнениям (3) и (4) на рис. 6 приведено семейство характеристик для I_n и U при условии $M_n = nM_k$.

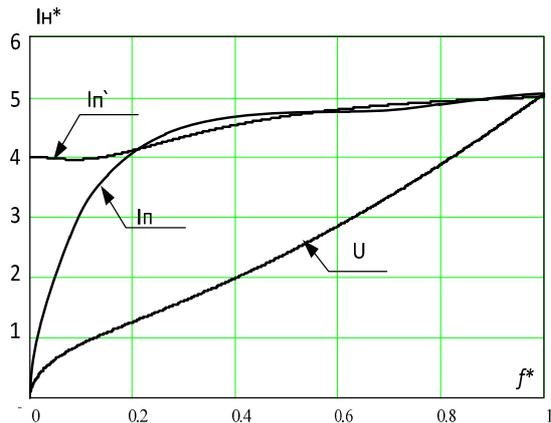
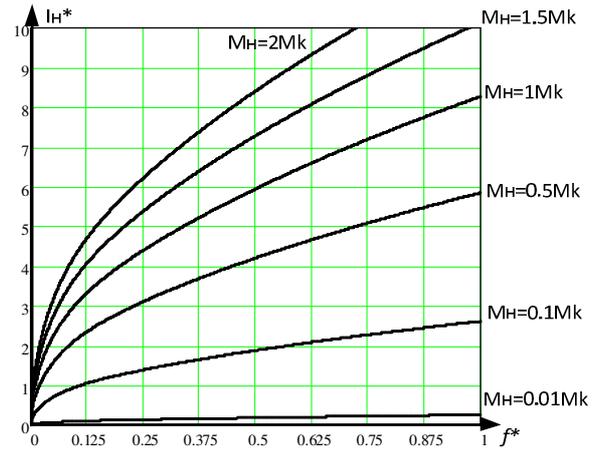


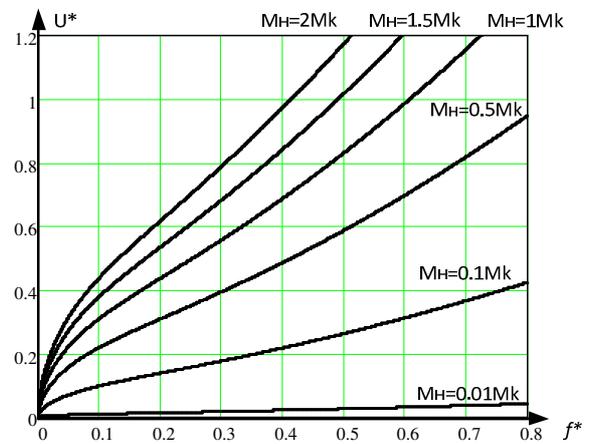
Рисунок 5 – Кривые изменения параметров асинхронной машины при условии $M_n = M_k$

Кривые тока и напряжения полностью совпадают с кривыми пересечения двух трехмерных графиков на рис. 3,а,б. Однако представленные характеристики не несут полную информацию о физических процессах, которые происходят в асинхронной машине при пуске. Если выбирать напряжение и частоту для создания заданного момента, опираясь только на кривые (рис. 6), то можно утверждать, что $M_n = 2M_k$ с $I_n \rightarrow \min$ при $U = 0,2U^*$ и $f_c = 0,01f^*$.

Из работ Сандлера А.С. и Сарбатова Р.С. известно, что при обеспечении постоянства перегрузочной способности асинхронного двигателя при частотном управлении магнитный поток машины значительно увеличивается в области низких частот [13]. Из динамической модели асинхронного двигателя получили значение магнитного тока (рис. 7). Из выражения (4) при заданном перегрузочном коэффициенте строим кривые зависимости магнитного потока от амплитуды и частоты питающего напряжения (рис. 7, кривая 1 $\Phi(U, f_c)$ при $M_n = 2M_k$, кривая 2 $\Phi(U, f_c)$ при $M_n = 3M_k$).



а)



б)

Рисунок 6 – Семейство характеристик тока (а) и напряжения питающей сети (б)

Расположив кривые тока, напряжения и магнитного потока в зависимости от частоты в одной плоскости в относительном измерении, можно определить $I_n \rightarrow \min$ с учетом области насыщения при условии $M_n = 2M_k$. Данные зависимости представлены на рис. 8.

Из рис. 8,а видно, что при максимально низком значении тока статора магнитный поток принимает максимальное значение и машина находится в насыщенном состоянии. При пуске двигателя желательно избегать такой диапазон токов и напряжений, которые при обеспечении постоянства момента приводят двигатель в эту область работы. Поэтому параметры f_c и U_c определяем с учетом кривой намагничивания и на основании выражения (5) получаем минимальное значение тока с заданным значением пускового момента $M_n = 2M_k$. Таким способом можно рассчитать минимальное значение тока при разных заданных значениях пускового момента.

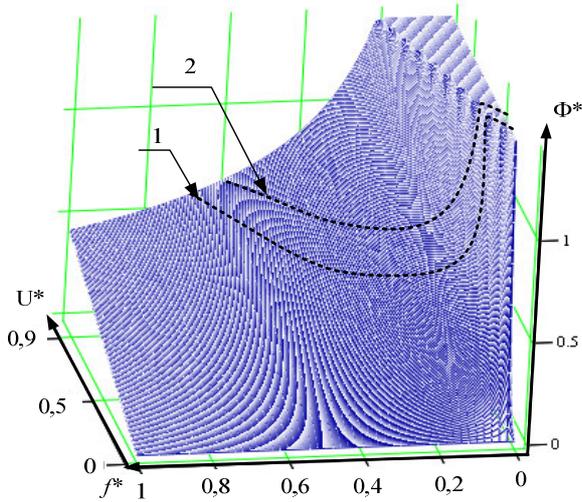
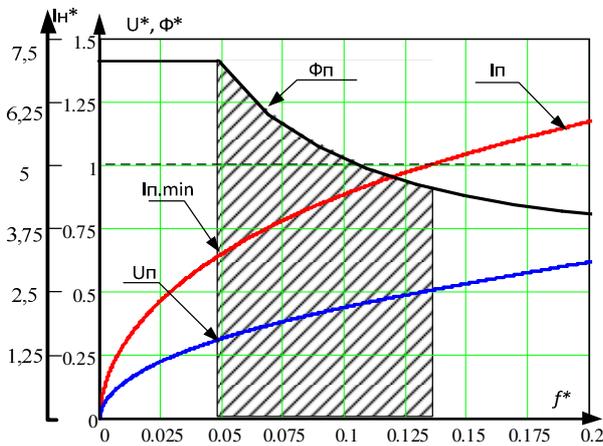
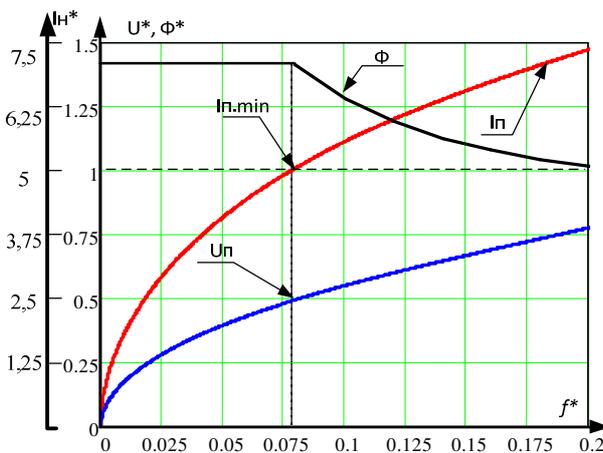


Рисунок 7 – Распределение магнитного потока от параметров напряжения питания



а)



б)

Рисунок 8 – Кривые тока, магнитного потока и напряжения при а) $M_n = 2M_k$; б) $M_n = 3M_k$

Таблица 2 – Значения пускового тока при заданных расчетных параметрах сети питания при формировании заданного пускового момента

Пусковой момент $M_n = kM_k$, Н·м	Значение пускового момента M_n , Н·м	Значение частоты f_c , Гц	Значение напряжения питания U_c , В	Пусковой ток $I_n = \min$, А
$M_n = 4M_k$	42	6,8	173,4	20,6
$M_n = 3,5M_k$	36,75	5,7	144	18
$M_n = 3M_k$	31,5	4,5	118,32	15,7
$M_n = 2,5M_k$	26,25	3,6	94,2	12,892
$M_n = 2M_k$	21	2,7	70	10,23
$M_n = 1,5M_k$	15,75	1,85	52,4	7,55
$M_n = M_k$	10,5	1,225	34,6	5

Результаты расчетов представлены в табл. 2. Например, для обеспечения пускового момента $M_n = 2M_k = 21$ (Нм) при минимальном значении тока $I_n = 10,23$ (А), не допуская насыщения двигателя, т.е. значения магнитного потока асинхронной машины $\Phi < 1,4 \cdot 3,7$ (Вб), необходимо подать на машину питание 70 Вт с частотой 2,7 Гц. При необходимости получения $M_n = 3M_k = 31,5$ (Нм) (рис. 8,б) при рассматриваемых условиях ток статора превышает значение допустимого пускового тока. В таком режиме двигатель не может работать долго, поэтому при таких параметрах питающей сети (табл. 2) необходимо дополнительно рассчитывать время работы асинхронной машины для предотвращения перегрева обмоток ротора. По результатам (табл. 2) определяем математические зависимости для представления интенсивности изменения параметров напряжения питания и асинхронного двигателя в зависимости от коэффициента k (рис. 8).

Для обеспечения условия минимизации тока при заданном перегрузочном коэффициенте получаем зависимости:

$$M_n(k) = 10,5k; \quad (6)$$

$$I_n(k) = -0,21 + 5,226k; \quad (7)$$

$$f_c(k) = 0,3 + 0,6k + 0,3214k^2 - 0,01k^3; \quad (8)$$

$$U_c(k) = 9,791 + 18,65k + 6,5447k^2 - 0,2489k^3. \quad (9)$$

Графическое отображение данных зависимостей представлено на рис. 8.

Для решения поставленной задачи предложена методика определения максимально возможного пускового момента при минимальном значении тока статора. Для уточненного определения параметров машины по экспериментальным или паспортным данным определяется кривая намагничивания и её математическое представление (в виде полинома).

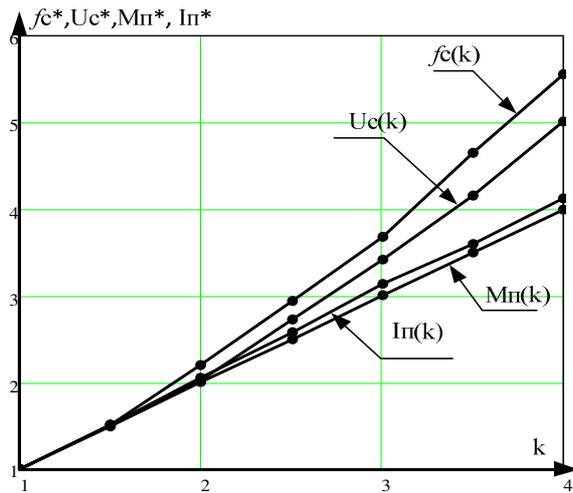


Рисунок 8 – Зависимость параметров напряжения питания и асинхронной машины для обеспечения условия минимизации тока при заданном перегрузочном коэффициенте

На динамической математической модели асинхронного двигателя итерационным методом, меняя диапазон и соотношение параметров питающей сети, определяются адекватные значения факторов влияния (напряжение и частота) для создания регрессионной модели. При заданном критерии оптимизации выполняется математический расчет регрессионной модели с получением полиномиальных зависимостей для $M_n(U, f)$ и $I_n(U, f)$. Диапазон варьирования f_c и U_c определяем из полинома $M_n(U, f)$, приравнивая к необходимому значению пускового момента. По паспортным данным рассчитываем максимально допустимый Φ_{max} , из математической зависимости $\Phi = F(I_\mu)$ определяем значения U_c и f_c в области насыщения двигателя. Полученные значения напряжения U_c и частоты питающей сети f_c удовлетворяют критерий оптимизации $I_i \rightarrow m^3 n$. По полученным значениям f_c и U_c формируем сигнал управления частотно-регулируемого асинхронного двигателя для создания необходимого пускового момента.

ВЫВОДЫ. Таким образом, в работе доказана возможность, получены условия и разработан алгоритм для формирования максимально допустимого пускового момента при минимуме пускового тока частотно-регулируемого электропривода технологических механизмов с тяжелыми условиями трогания и пуска.

Асинхронная машина при полученных значениях параметров напряжения сети питания может работать продолжительное время. Однако существуют такие режимы трогания, которые требуют создания пускового момента, в 3...5 раз превышающего критический. Для этого можно использовать приведенный выше алгоритм определения пускового момен-

та, но при этом пусковой ток будет превышать номинальный почти в 10 раз. Данный режим работы асинхронной машины нежелателен, но допустим на короткий период времени. Чем больше значение пускового тока, тем меньше время работы при таком режиме работы.

Поэтому дальнейшее исследование по определению момента асинхронного двигателя для реализации процесса трогания, по мнению авторов, следует проводить с введением дополнительного параметра, который является временным показателем работы двигателя с пусковыми токами выше допустимого номинала для обеспечения $M_n = 3...5 M_k$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черный А.П., Гладырь А.И., Осадчук Ю.Г. и др. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов: монография. – Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2006. – 280 с.
2. Гладырь А.И., Хребтова О.А. Системы управляемого трогания на базе частотно-регулируемых электроприводов // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – Вип. 4/2007 (45). – Кременчуг: КДПУ, 2007. – С. 8–13.
3. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Энергия, 1966. – 146 с.
4. Огарь В.А., Калинов А.П. Характеристики асинхронных двигателей с учетом нелинейности кривой намагничивания // Електромашинобудування та електрообладнання: міжвід. наук.-техн. збір. «Пробл. автомат. електропривода. Теорія і практика». – 2006. – Вип. 66. – С. 226–229.
5. Петрушин В.С., Бендахман Бухалфа, Якимец А.М., Каленик О.В. Влияние насыщения стали магнитопровода и вытеснения тока в обмотке ротора на динамические характеристики регулируемых асинхронных двигателей // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 2. – С. 20–25.
6. Штурман Г.И. К вопросам частотного управления асинхронными двигателями // Вестник электропромышленности. – 1946. – № 2. – С. 30–35.
7. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 289 с.
8. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. – М.: Энергоиздат, 1981. – 577 с.
9. Якимов В.В. Проблемы учета потерь в стали при расчете переходных процессов в электрических машинах переменного тока // Тезисы докл. на II Международной конференции по электромеханике и электротехнологии. Часть 1. – Крым, 1–5 октября 1996 г. – С. 172–174.
10. Беспалов В.Я., Мощинский Ю.А., Петров А.П. Математическая модель асинхронного двигателя в обобщенной ортогональной системе

координат // *Електричество*. – 2002. – № 8. – С. 33–39.

11. Огарь В.А., Калинов А.П. Уточнение характеристик асинхронных двигателей с учетом изменения их параметров в пусковых режимах // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. – Вип. 3/2006 (39), част. 1. – Кременчук: КрНУ, 2006. – С. 45–49.

12. Родькин Д.И., Ченчевой В.В., Огарь В.О. Об определении потерь в стали асинхронного двигателя при глубоком ее насыщении // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал*. – Кременчук: КрНУ, 2013. – Вип. 2/2013 (22). – С. 75–85.

13. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Энергия, 1974. – 328 с.

DEFINING MOMENT INDUCTION MOTORS AT STARTING*

O. Khrebtova, V. Chencheyov, V. Ogar

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: 34092@ukr.net

The article describes the method of determining the parameters of the mains for the frequency-controlled induction motor under heavy starting and pulling away. It is established that the use of a regression model displays polynomial dependence starting torque and current on the amplitude and frequency of the supply voltage allows you to get the maximum starting torque with minimum start-up current with the magnetization curve for technological mechanisms in heavy pulling away and start-up. The regression model is obtained by experimental design, the input parameters are determined on the basis of a mathematical model of three-phase induction motor in the coordinate system. To approximate the magnetization curve of the experimental data the authors proposed to use the Lock (Verzyera) Agnesi, which displays the actual processes in the low-frequency power.

Key words: VFD, heavy pick-up and start-up conditions, the magnetization curve, the mathematical model, a hypothetical method, regression mathematical model.

REFERENCES

1. Cherny, A.P., Gladyr, A.I., Osadchuk, J.G. and oth. (2006), *Puskovyye sistemy nereguliruyemykh elektroprivodov*, Monograph [Launch systems unregulated electric drives], PE Scherbatykh A.V., Kremenchug, Ukraine. (in Russian)

2. Gladyr, A.I. and Khrebtova, O.A. (2007), "System managed breakaway based variable frequency drives", *Visnyk KDPU: Naukovi pratsy KDPU*, Vol. 4, no. 45, pp. 8–13. (in Russian)

3. Sandler, A. and Sarbatov, R.S. (1966), *Chastotnoye upravleniye asinkhronnymi dvigatelyami*, [Frequency control induction motors], Energiya, Moscow, Russia. (in Russian)

4. Ogar, V.A. and Kalinov, A.P. (2006), "Performance of asynchronous motors with the nonlinearity of the magnetization curve", *Elektromashynobuduvannya ta elektroobladnannya*, Vol. 66, pp. 226–229. (in Russian)

5. Petrushin, V.S., Bendahman, Buhalfa, Iakimets, A.M. and Kalenik, O.V. (2010), "The influence of the magnetic saturation of steel and displacement current in the rotor winding on the dynamic characteristics of controlled asynchronous motors", *Elektrotehnika i elektromekhanika*, no. 2. (in Russian)

6. Shturman, G.I. (1946), "The issues of frequency control of induction motors", *Vestnik elektropromyshlennosti*, no. 2. (in Russian)

7. Adler, Yu.P., Markova, E.V. and Granovsky, Y.V. (1976), *Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy* [Design of Experiments in search of optimum conditions], Nauka, Moscow, Russia. (in Russian)

8. Chilikin, M.G. and Sandler, A.S. (1981), *Obshchiy kurs elektroprivoda* [The general course of the drive], Energoizdat, Moscow, Russia. (in Russian)

9. Yakimov, V.V. (1996), "Problems account for losses in the steel in the calculation of transients in electric machines AC", *II Mezhdunarodnaya konferentsiya po elektromekhanike i elektrotekhnologii* [II International Conference on electrical engineering and electrical technology], Crimea, Ukraine, 1–5 October 1996, pp. 172–174. (in Russian)

10. Bepalov, V.Ya. Moshchinskiy, Yu.A. and Petrov, A.P. (2002), "Mathematical model of an induction motor in a generalized orthogonal coordinate system", *Electrichestvo*, no. 8, pp. 33–39. (in Russian)

11. Ogar, V.A. and Kalinov, A.P. (2006), "Clarifying characteristics of induction motors, adjusting their parameters in the starting conditions", *Visnyk KDPU: Naukovi pratsy KDPU*, Vol. 3, no. 39, part 1, pp. 45–49. (in Russian)

12. Rodkin, D.I., Chencheyov, V.V. and Ogar, V.A. (2013), "On the determination of the iron loss induction motor with its deep saturation", *Elektromekhanichny i energozberigayuchy systemy*, Vol. 2, no. 22, pp. 75. (in Russian)

13. Sandler, A.S. and Sarbatov, R.S. (1974), *Avtomaticheskoye chastotnoye upravleniye asinkhronnymi dvigatelyami* [Automatic frequency control of induction motors], Energiya, Moscow, Russia. (in Russian)

Стаття надійшла 13.09.2013.

* This work was done under the guidance of Prof. Rodkin D.Y.