

УСТРОЙСТВО ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

А.Ю. АФАНАСЬЕВ, В.Г. МАКАРОВ, Ю.А. ЯКОВЛЕВ, В.Н. ХАННАНОВА

Казанский национальный исследовательский технологический университет

Проводится анализ методов идентификации параметров автоматических систем и электрических двигателей. Показано, что для идентификации параметров трехфазного асинхронного двигателя целесообразно использовать непрерывный градиентный метод поиска минимума функции. Приводится математическая модель системы идентификации параметров асинхронного двигателя. Разработана функциональная схема устройства идентификации. Показано, что устройство идентификации может быть реализовано с использованием простых элементов – перемножителей, сумматоров и интеграторов.

Ключевые слова: идентификация параметров, градиентный метод поиска минимума функции, трехфазный асинхронный двигатель, обобщенная электрическая машина.

Введение

Для эффективного управления асинхронным двигателем (АД), работающим в составе частотно-регулируемого электропривода, необходимо располагать информацией о текущих значениях параметров схемы замещения фазы и нагрузки. Параметрами Т-образной схемы замещения фазы АД являются: активные сопротивления и индуктивности фаз обмоток статора и ротора, а также взаимная индуктивность. К параметрам нагрузки относятся суммарный момент инерции подвижных частей и статический момент. Перечисленные параметры в процессе функционирования электропривода могут изменяться в силу многих причин, например, таких как нагрев и охлаждение обмоток, изменение состояния магнитной цепи и др. В связи с этим возникают отклонения параметров, приводящие к отклонениям основных величин от заданных значений. Поэтому для реализации более точных алгоритмов управления, обеспечивающих эффективное энерго- и ресурсосбережение, необходима оценка (идентификация) перечисленных параметров.

Методы, применяемые при идентификации параметров автоматических систем, рассматриваются в работах [1 – 3]. Среди них можно выделить следующие группы методов идентификации, которые нашли широкое применение в технике:

- 1) метод идентификации с помощью синусоидальных ступенчатых и импульсных сигналов;
- 2) метод корреляционных функций;
- 3) идентификация с помощью регрессионных методов;
- 4) последовательные регрессионные методы;
- 5) идентификация методами стохастической аппроксимации и последовательного обучения;
- 6) идентификация методом квазилинеаризации;
- 7) идентификация методом инвариантного погружения;
- 8) градиентные методы идентификации;
- 9) эвристические методы идентификации и др.

Ни один из приведенных методов не подходит для идентификации всех видов систем. Каждый из них имеет свою область или области применения. Например, метод идентификации с использованием синусоидального, ступенчатого или импульсного сигналов не всегда может быть применен в режиме нормального функционирования. Идентификацию по импульсному воздействию нельзя применить к линеаризованным системам.

Метод корреляционных функций применим лишь к линейным системам с медленно изменяющимися характеристиками.

Квазилинеаризация – это не прямой вычислительный метод идентификации. Он представляет собой итеративный алгоритм, для сходимости которого часто требуется очень хорошее начальное приближение. Недостатком данного метода является сильное сужение области сходимости, а также вычислительные трудности, связанные с решением большого количества дифференциальных уравнений.

Идентификация методом инвариантного погружения требует значительного количества априорной информации о форме нелинейной функции, параметры которой необходимо идентифицировать. Этот метод так же ограничен вычислительными трудностями.

Проведем анализ методов идентификации параметров электрических машин.

В большинстве случаев параметры схемы замещения фазы АД определяют по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания [4 – 8], что не всегда возможно (например в режиме нормального функционирования электропривода) и мало эффективно (низкая точность оценки). В связи с этим актуальной является задача идентификации параметров АД. Далее приводится обзор работ, посвященных решению этой задачи.

Алгоритм идентификации параметров АД, полученный на основе анализа математической модели машины при установившейся частоте вращения, предлагается в работе [9]. Относительная погрешность предлагаемого метода при оценке активного сопротивления статора составила не более 5 %, а активного сопротивления ротора – не более 36 %.

Алгоритмы одновременной идентификации частоты вращения и составляющих вектора потокосцепления ротора АД с короткозамкнутым ротором по измерениям токов и напряжений его статорных обмоток предлагаются в работе [10]. В статье рассмотрена существующая аналоговая реализация идентификатора частоты вращения и составляющих потокосцепления ротора. Недостатками схемы являются сложность системы управления, невысокая надежность и сложность наладки. Здесь же предложены подходы к синтезу цифровых (микропроцессорных) идентификаторов частоты вращения и составляющих потокосцепления ротора АД.

В работе [11] рассматриваются свойства системы дифференциальных уравнений АД с короткозамкнутым ротором в смысле соответствия значений коэффициентов уравнений параметрам схемы замещения фазы АД. Показано, что одним и тем же значениям напряжений, токов, моментов и частот вращения соответствует не один АД, а множество машин с одинаковыми значениями сопротивления и индуктивности статорной обмотки, но отличающихся значениями индуктивностей рассеяния и взаимной индукции и сопротивления ротора. И, как следствие, по измерениям напряжений и токов обмоток статора, частоты вращения ротора и электромагнитного момента невозможно определить все пять параметров Т-образной схемы замещения фазы АД с короткозамкнутым ротором. Однако по этим измерениям возможна полная идентификация коэффициентов дифференциальных уравнений, описывающих АД, и определение четырех характерных параметров (конкретным значениям коэффициентов уравнений соответствуют одни и только одни значения параметров двигателя). Этими

параметрами могут являться значения активного сопротивления и индуктивности статора, коэффициента рассеяния и постоянной времени ротора.

Адаптивно-векторная система управления бездатчикового асинхронного электропривода серии ЭПВ, обеспечивающая оценку потокосцепления ротора, скорости ротора и электромагнитного момента, рассматривается в работе [12]. В статье показано, что наибольшим изменениям в процессе работы АД подвергаются активные сопротивления статора, ротора и взаимная индуктивность. Поэтому в предлагаемой системе управления в первую очередь производится оценка именно этих параметров. На основе оценок активных сопротивлений статора, ротора и взаимной индуктивности производится оценка потокосцепления ротора, скорости ротора и электромагнитного момента. Предлагается алгоритм адаптации системы управления к изменениям активных сопротивлений статора, ротора и взаимной индуктивности.

В статье [13] рассматривается алгоритм идентификации частоты вращения бездатчикового асинхронного электропривода, адаптивный к изменениям активного сопротивления статора.

В работе [14] предлагается проводить идентификацию параметров АД следующими способами: на основе методов оценивания, поисковых алгоритмов и искусственных нейронных сетей.

В [15] рассматривается метод идентификации параметров АД, согласно которому задача идентификации решается в два этапа:

- 1) первоначальная настройка системы управления на параметры силового канала;
- 2) адаптация системы управления к изменению параметров привода в процессе его работы.

Для автоматической первоначальной настройки системы наиболее удачными являются режим «неподвижного» вектора, а также режим реального холостого хода двигателя. Результатом первоначальной настройки являются следующие параметры: активное сопротивление статора, индуктивность намагничивающего контура и произведение коэффициента рассеяния на индуктивность статора. Второй этап «адаптация системы» обычно проводят по следующим параметрам: постоянной времени ротора и параметрам механической части привода. На основании приведенных способов и алгоритмов предложен [15] пример построения наблюдателя состояния асинхронного электропривода с адаптивно-векторным управлением без датчика скорости.

С использованием непрерывного градиентного метода поиска минимума функции разработаны алгоритмы и схемы устройств идентификации параметров двигателя постоянного тока [16], синхронного [17] и асинхронного [18 – 20] двигателей. Преимуществами непрерывного градиентного метода идентификации является простота реализации и хорошая сходимость в окрестности экстремума. В статье [18] приводится алгоритм и результаты компьютерного моделирования процессов идентификации параметров трехфазного АД, однако не рассматриваются вопросы построения устройства идентификации на их основе, которое реализовано в патенте [20]. Одним из основных вопросов, рассматриваемых в статье, является разработка устройства идентификации параметров трехфазного АД, в основу работы которого положен непрерывный градиентный метод поиска минимума функции. Устройство предназначено для работы в составе частотно-регулируемого асинхронного электропривода.

Методика исследования

Рассмотрим устройство идентификации параметров трехфазного АД с короткозамкнутым ротором [20].

Непосредственному наблюдению и измерению у трехфазного АД с короткозамкнутым ротором подлежат управляемые процессы – токи $i_{1A}(t)$, $i_{1B}(t)$, $i_{1C}(t)$ и напряжения $u_{1A}(t)$, $u_{1B}(t)$, $u_{1C}(t)$ фаз обмотки статора, частота вращения $\omega(t)$ и угловое ускорение $\dot{\omega}(t)$. При построении алгоритмов управления частотно-регулируемого электропривода с АД широко используется математическое описание обобщенной электрической машины (ОЭМ). В связи с этим неотъемлемой частью систем управления подобных электроприводов является преобразователь координат, позволяющий преобразовывать величины трехфазного АД в величины ОЭМ и наоборот. Поэтому при идентификации параметров целесообразно использовать математическое описание ОЭМ. Таким образом, наблюдаемыми и управляемыми процессами являются токи $i_{1d}(t)$, $i_{1q}(t)$ и напряжения $u_{1d}(t)$, $u_{1q}(t)$ фаз обмотки статора ОЭМ, частота вращения $\omega(t)$ и угловое ускорение $\dot{\omega}(t)$. При этом оценке подлежат следующие параметры ОЭМ: активные сопротивления фаз обмоток статора R_1 и ротора R_2 , индуктивности фаз обмоток статора L_1 и ротора L_2 , взаимная индуктивность M_m , суммарный момент инерции подвижных частей J_Σ и статический момент M_c .

На рис. 1 показана обобщенная структурная схема асинхронного электропривода. Объект управления механически связан с асинхронным двигателем и с блоком датчиков частоты вращения $\omega(t)$, углового ускорения $\dot{\omega}(t)$, фазных напряжений $u_{1A}(t)$, $u_{1B}(t)$, $u_{1C}(t)$ и токов $i_{1A}(t)$, $i_{1B}(t)$, $i_{1C}(t)$ статора. В состав блока датчиков могут входить датчики Холла, установленные в ортогональных осях обмотки статора асинхронного двигателя. Преобразователь координат преобразует фазные величины трехфазного АД в величины ОЭМ, а также осуществляет вычисление производных токов ОЭМ. На основании информации, поступающей от блока датчиков и преобразователя координат, устройство идентификации формирует сигналы оценок параметров $R_1(t)$, $L_1(t)$, $R_2(t)$, $L_2(t)$, $M_m(t)$, $J_\Sigma(t)$, $M_c(t)$. Асинхронный двигатель питается от преобразователя частоты, на который с устройства управления поступает сигнал задания требуемого электромагнитного момента $M_3^0(t)$. На преобразователь частоты поступают также сигналы оценок параметров. На входы устройства управления поступают входные воздействия $\alpha_0(t)$, $\omega_0(t)$, сигналы оценок параметров $R_1(t)$, $L_1(t)$, $R_2(t)$, $L_2(t)$, $M_m(t)$, $J_\Sigma(t)$, $M_c(t)$, а также сигналы обратной связи $\alpha(t)$, $\omega(t)$ от соответствующих датчиков. На основе поступающей информации устройство управления формирует алгоритм частотного управления моментом и скоростью асинхронного двигателя.

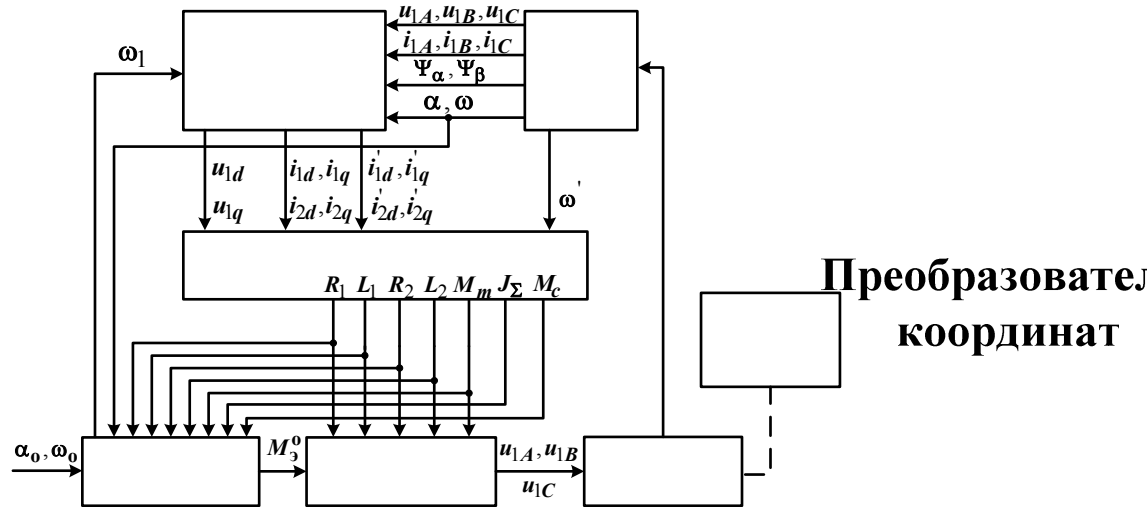


Рис. 1. Обобщенная структурная схема асинхронного электропривода

Наблюдаемые процессы и неизвестные параметры удовлетворяют алгебраическим и дифференциальным уравнениям. Рассмотрим идентификацию параметров АД с использованием непрерывного градиентного метода поиска минимума функции.

Математическая модель трехфазного АД с короткозамкнутым ротором с позиций теории ОЭМ приводится в работах [5, 18, 21]. В математической модели АД величины и параметры ротора приведены к статору, а в уравнениях движения и электромагнитного момента используются электромагнитный, статический, а также момент инерции реального АД.

Непрерывный градиентный метод идентификации предполагает выбор одной или нескольких определенно-положительных функций от невязок уравнений электропривода и изменение оценок параметров со скоростями, пропорциональными частным производным от этих функций по параметрам, подлежащим оценке [16 – 20].

Система уравнений ОЭМ, записанная при условии, что все параметры являются истинными, будет иметь вид:

$$\begin{cases} u_{1d} = R_{10}i_{1d} + L_{10}\dot{i}_{1d} + M_{m0}\dot{i}_{2d} - \omega_1(L_{10}i_{1q} + M_{m0}i_{2q}); \\ u_{1q} = R_{10}i_{1q} + L_{10}\dot{i}_{1q} + M_{m0}\dot{i}_{2q} + \omega_1(L_{10}i_{1d} + M_{m0}i_{2d}); \\ 0 = R_{20}i_{2d} + L_{20}\dot{i}_{2d} + M_{m0}\dot{i}_{1d} - \omega_2(L_{20}i_{2q} + M_{m0}i_{1q}); \\ 0 = R_{20}i_{2q} + L_{20}\dot{i}_{2q} + M_{m0}\dot{i}_{1q} + \omega_2(L_{20}i_{2d} + M_{m0}i_{1d}); \\ J_{\Sigma 0}\dot{\omega} = p_{\Pi}(p_{\Pi}M_{m0}(i_{2d}i_{1q} - i_{2q}i_{1d}) - M_{c0}), \end{cases} \quad (1)$$

где ω_1 – частота вращения системы координат d, q ; ω_2 – частота скольжения ($\omega_2 = \omega_1 - \omega$); ω – частота вращения ротора, эл. рад/с; $\dot{\omega}$ – производная частоты вращения ротора (угловое ускорение); i_{2d}, i_{2q} – токи фаз обмотки ротора ОЭМ; p_{Π} – число пар полюсов; индексами $_0$ обозначены истинные значения параметров.

Токи короткозамкнутого ротора не подлежат непосредственному измерению, поэтому значения токов ротора i_{2d}, i_{2q} необходимо восстанавливать на основании сигналов потокосцеплений Ψ_{α} и Ψ_{β} , поступающих от датчиков Холла, установленных

в ортогональных осях расточки статора. Направление оси α выбирают таким образом, чтобы она совпадала с осью A_1 статора. Тогда уравнения преобразования потокосцеплений Ψ_α и Ψ_β к осям d, q можно записать в виде:

$$\Psi_d = \Psi_\alpha \cos \alpha_1 + \Psi_\beta \sin \alpha_1; \quad \Psi_q = -\Psi_\alpha \sin \alpha_1 + \Psi_\beta \cos \alpha_1, \quad 2)$$

где α_1 – угол между осью A_1 статора (осью α) и осью d .

Выражения потокосцеплений по осям d, q имеют вид:

$$\Psi_d = M_m (i_{1d} + i_{2d}); \quad \Psi_q = M_m (i_{1q} + i_{2q}). \quad 3)$$

Для восстановления токов i_{2d}, i_{2q} воспользуемся выражениями:

$$i_{2d} = \frac{\Psi_d}{M_m} - i_{1d}; \quad i_{2q} = \frac{\Psi_q}{M_m} - i_{1q}. \quad 4)$$

Оценки параметров условимся обозначать: $R_1, L_1, R_2, L_2, M_m, J_\Sigma$ и M_c . В случае идеальном оценки и истинные значения параметров должны совпадать, однако оценки в произвольный момент времени отличаются от истинных значений параметров. В связи с этим появляются отклонения, именуемые невязками:

$$\begin{cases} \Delta u_{1d} = R_1 \dot{i}_{1d} + L_1 \dot{i}'_{1d} + M_m \dot{i}'_{2d} - \omega_1 (L_1 i_{1q} + M_m i_{2q}) - u_{1d}; \\ \Delta u_{1q} = R_1 \dot{i}_{1q} + L_1 \dot{i}'_{1q} + M_m \dot{i}'_{2q} + \omega_1 (L_1 i_{1d} + M_m i_{2d}) - u_{1q}; \\ \Delta u_{2d} = R_2 \dot{i}_{2d} + L_2 \dot{i}'_{2d} + M_m \dot{i}'_{1d} - \omega_2 (L_2 i_{2q} + M_m i_{1q}); \\ \Delta u_{2q} = R_2 \dot{i}_{2q} + L_2 \dot{i}'_{2q} + M_m \dot{i}'_{1q} + \omega_2 (L_2 i_{2d} + M_m i_{1d}); \\ \Delta M = J_\Sigma \dot{\omega} + p_\Pi M_c - p_\Pi^2 M_m (i_{2d} \dot{i}_{1q} - i_{2q} \dot{i}_{1d}). \end{cases} \quad 5)$$

Введем функции невязок:

$$V_{u_1} = \frac{1}{2} \left[(\Delta u_{1d})^2 + (\Delta u_{1q})^2 \right]; \quad V_{u_2} = \frac{1}{2} \left[(\Delta u_{2d})^2 + (\Delta u_{2q})^2 \right]; \quad V_M = \frac{1}{2} (\Delta M)^2.$$

Невязки в процессе идентификации должны стремиться к нулю, а функции невязок должны быть минимизированы.

Составим систему дифференциальных уравнений относительно оценок параметров согласно непрерывному градиентному методу поиска минимума функции или, иначе говоря, определим скорости изменения оценок параметров:

$$\frac{dR_1}{dt} = -\mu_{R_1} \frac{\partial V_{u_1}}{\partial R_1} = -\mu_{R_1} \left[\Delta u_{1d} \dot{i}_{1d} + \Delta u_{1q} \dot{i}_{1q} \right]; \quad 6)$$

$$\frac{dL_1}{dt} = -\mu_{L_1} \frac{\partial V_{u_1}}{\partial L_1} = -\mu_{L_1} \left[\Delta u_{1d} \dot{i}'_{1d} + \Delta u_{1q} \dot{i}'_{1q} \right]; \quad 7)$$

$$\frac{dR_2}{dt} = -\mu_{R_2} \frac{\partial V_{u_2}}{\partial R_2} = -\mu_{R_2} \left[\Delta u_{2d} \dot{i}_{2d} + \Delta u_{2q} \dot{i}_{2q} \right]; \quad 8)$$

$$\frac{dL_2}{dt} = -\mu_{L_2} \frac{\partial V_{u_2}}{\partial L_2} = -\mu_{L_2} \left[\Delta u_{2d} \dot{i}'_{2d} + \Delta u_{2q} \dot{i}'_{2q} \right]; \quad 9)$$

$$\frac{dM_m}{dt} = -\mu_{M_m} \left[\frac{\partial V_{u_1}}{\partial M_m} + \frac{\partial V_{u_2}}{\partial M_m} + \lambda \frac{\partial V_M}{\partial M_m} \right] = -\mu_{M_m} \left[\Delta u_{1d} (\dot{i}'_{2d} - \omega_1 i_{2q}) + \Delta u_{1q} (\dot{i}'_{2q} + \omega_1 i_{2d}) \right] +$$

$$+ \Delta u_{2d} \left(\dot{i}_{1d} - \omega_2 \dot{i}_{1q} \right) + \Delta u_{2q} \left(\dot{i}_{1q} + \omega_2 \dot{i}_{1d} \right) - \lambda \Delta M p_{\Pi}^2 \left(i_{2d} \dot{i}_{1q} - i_{2q} \dot{i}_{1d} \right) \Big]; \quad (10)$$

$$\frac{dJ_{\Sigma}}{dt} = -\mu_{J_{\Sigma}} \frac{\partial V_M}{\partial J_{\Sigma}} = -\mu_{J_{\Sigma}} \dot{\omega} \Delta M; \quad (11)$$

$$\frac{dM_c}{dt} = -\mu_M \frac{\partial V_M}{\partial M_c} = -\mu_M p_{\Pi} \Delta M, \quad (12)$$

где μ_{R_1} , μ_{L_1} , μ_{R_2} , μ_{L_2} , μ_{M_m} , $\mu_{J_{\Sigma}}$, μ_M – положительные коэффициенты, определяющие скорости изменения оценок параметров; λ – весовой коэффициент, определяющий относительное влияние функций невязок V_{u_1} , V_{u_2} , V_M .

Величины коэффициентов μ_{R_1} , μ_{L_1} , μ_{R_2} , μ_{L_2} , μ_{M_m} , $\mu_{J_{\Sigma}}$, μ_M выбираются согласно характеру сигналов $i_{1d}(t)$, $i_{2d}(t)$, $i_{1q}(t)$, $i_{2q}(t)$, $\dot{i}_{1d}(t)$, $\dot{i}_{2d}(t)$, $\dot{i}_{1q}(t)$, $\dot{i}_{2q}(t)$, $\omega_1(t)$, $\omega_2(t)$, $\dot{\omega}(t)$ и общим требованиям к электроприводу.

Таким образом, систему уравнений ОЭМ (1) можно рассматривать как математическую модель объекта идентификации, а систему уравнений (5), в совокупности с уравнениями (4), (6) – (12), – как математическую модель системы идентификации параметров обобщенной машины R_1 , L_1 , R_2 , L_2 , M_m , J_{Σ} и M_c . Для реализации вычислений по выражениям (4) необходимо использовать сигнал оценки M_m , формируемый согласно уравнению (10).

Основные результаты

На основании математической модели системы идентификации параметров ОЭМ разработана представленная на рис. 2 структурная схема устройства идентификации параметров [20], предназначенного для работы в составе асинхронного электропривода. Совместно с устройством идентификации параметров (УИП) используется блок датчиков (БД) и преобразователь координат (ПК). БД, подключенный к АД, содержит в своем составе датчики фазных напряжений и токов статора, датчики Холла, установленные по расточке статора в ортогональных осях, датчик частоты вращения и датчик углового ускорения.

Выходными сигналами БД являются величины: $u_{1A}(t)$, $u_{1B}(t)$, $u_{1C}(t)$, $i_{1A}(t)$, $i_{1B}(t)$, $i_{1C}(t)$, $\Psi_{\alpha}(t)$, $\Psi_{\beta}(t)$, $\omega(t)$ и $\dot{\omega}(t)$, которые, за исключением $\dot{\omega}(t)$, подаются на ПК. Сигнал $\omega_1(t)$ поступает от системы управления электропривода.

Функциями ПК являются:

- 1) преобразование фазных напряжений и токов статора АД в напряжения и токи статора ОЭМ;
- 2) преобразование потокосцеплений;
- 3) восстановление токов ротора ОЭМ;
- 4) вычисление производных $\dot{i}_{1d}(t)$, $\dot{i}_{1q}(t)$, $\dot{i}_{2d}(t)$, $\dot{i}_{2q}(t)$;
- 5) расчет частоты вращения.

Вопросы преобразования фазных величин трехфазного АД в величины ОЭМ рассматриваются в работах [22 – 25].

Устройство идентификации параметров (см. рис. 2) содержит в своем составе следующие блоки:

- 1) блок вычисления невязок напряжений статора (БВННС);
- 2) блок вычисления невязок напряжений ротора (БВННР);
- 3) блок вычисления невязки момента (БВНМ);
- 4) блок оценок параметров (БОП).

Рассмотрим функции перечисленных блоков:

- 1) БВННС осуществляет вычисление невязок напряжений статора Δu_{1d} , Δu_{1q} в соответствии с первым и вторым уравнениями системы (5);
- 2) БВННР вычисляет невязки напряжений ротора Δu_{2d} , Δu_{2q} в соответствии с третьим и четвертым уравнениями системы (5);
- 3) БВНМ вычисляет невязку момента ΔM в соответствии с пятым уравнением системы (5);
- 4) БОП вырабатывает оценки параметров $R_1(t)$, $L_1(t)$, $R_2(t)$, $L_2(t)$, $M_m(t)$, $J_\Sigma(t)$, $M_c(t)$.

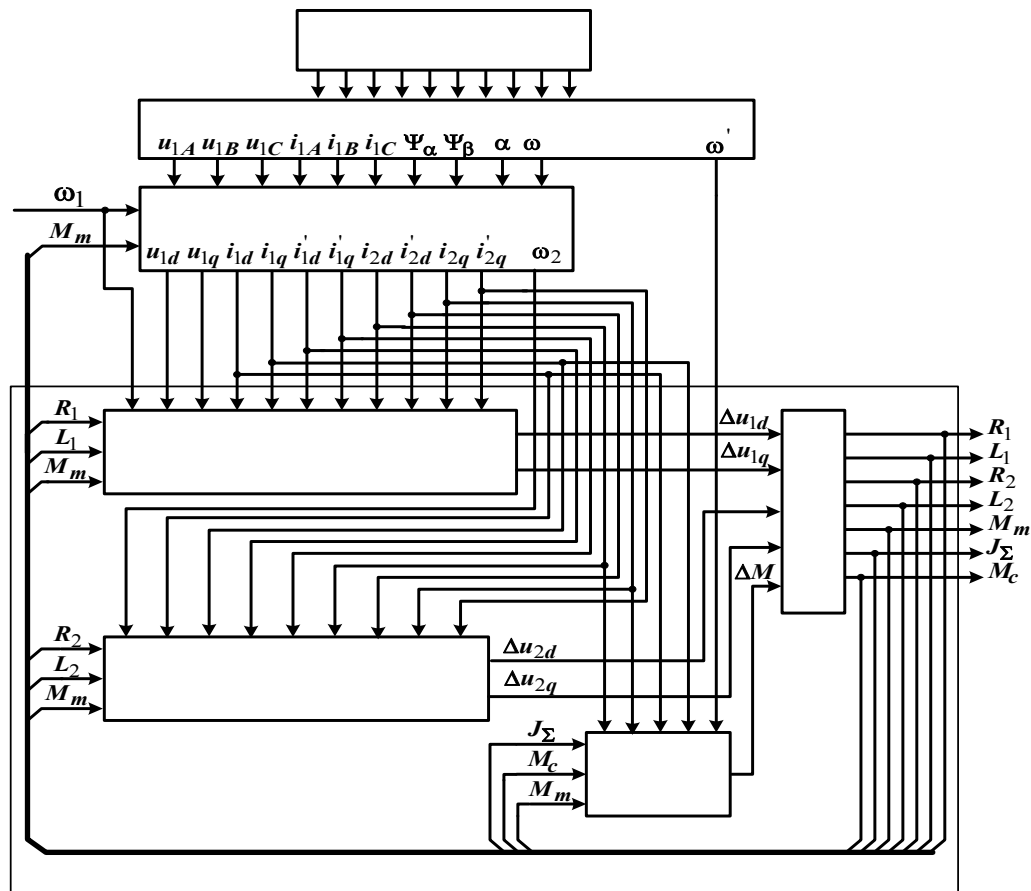


Рис. 2. Структурная схема асинхронного электропривода с устройством идентификации параметров

На основании системы уравнений (5) и уравнений (4), (6) – (12), а также в соответствии со структурной схемой (см. рис. 2) разработана представленная на рис. 2 функциональная схема УИП. Очевидно, что устройство идентификации может быть реализовано на простых элементах, таких как сумматоры (С1 – С16), интеграторы (И1 – И7) и перемножители (П1 – П50).

В схеме на рис. 3 не показаны масштабирующие блоки с коэффициентами p_{Π}^2 , λ и p_{Π} , используемые при решении уравнений (10) и (12) соответственно.

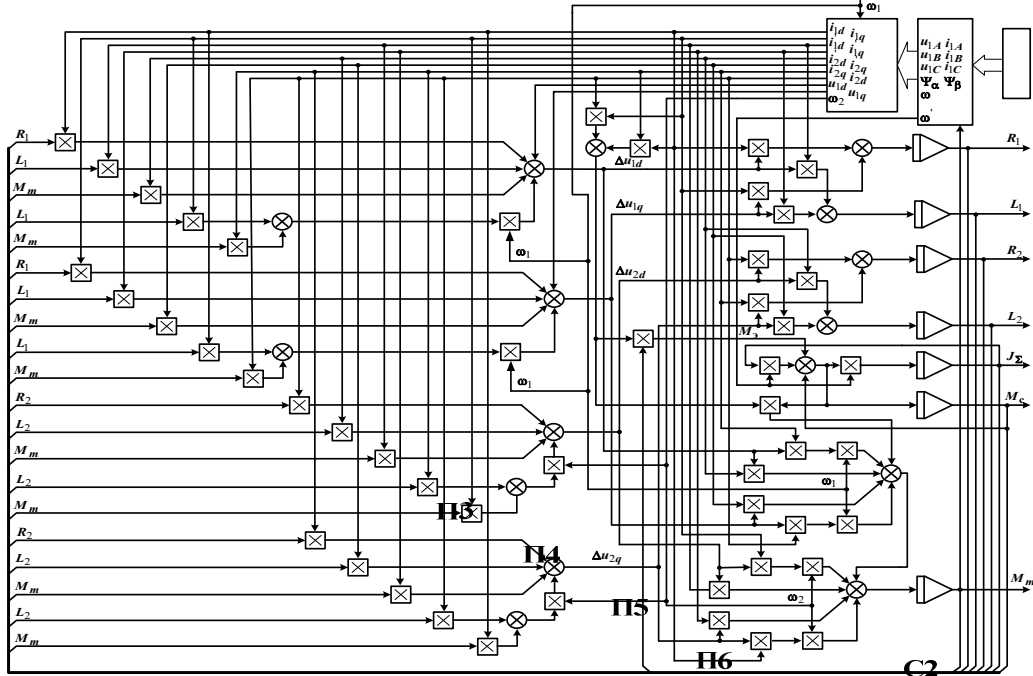


Рис. 3. Функциональная схема устройства идентификации параметров

На рис. 4 показана функциональная схема БД и ПК.

БД содержит в себе датчики фазных напряжений статора (ДН1 – ДН3); датчики фазных токов статора (ДТ1 – ДТ3); датчики Холла (ДХ1, ДХ2); датчик частоты вращения (ДЧВ) и датчик углового ускорения (ДУУ).

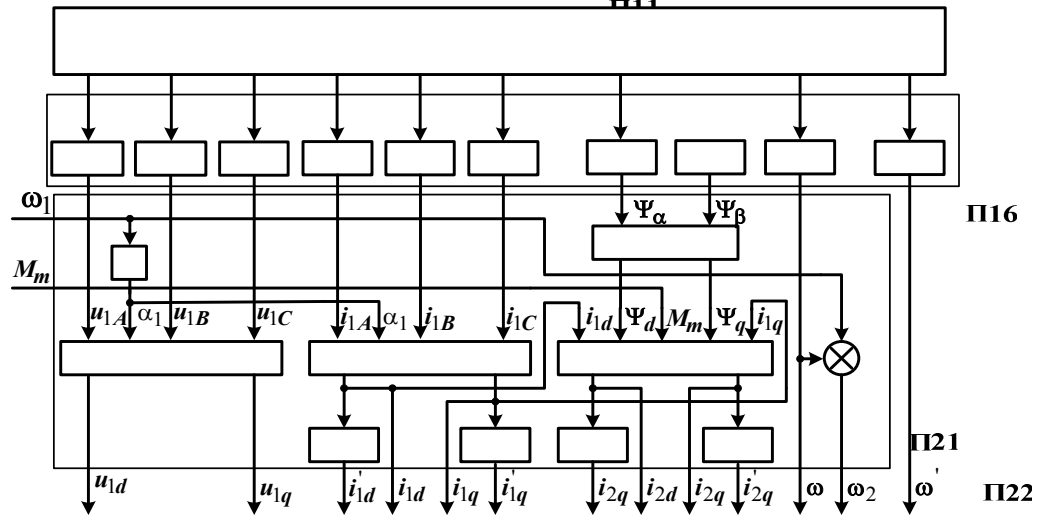


Рис. 4. Схема блока датчиков и преобразователя координат

ПК содержит в себе следующие блоки:

- 1) преобразователь потокосцеплений (ППС);
- 2) интегратор (И);
- 3) преобразователь фазных напряжений статора (ПНС);
- 4) преобразователь фазных токов статора (ПТС);
- 5) блок вычисления фазных токов ротора (БВТР);
- 6) сумматор (С1);
- 7) устройства дифференцирования (УД1 – УД4).

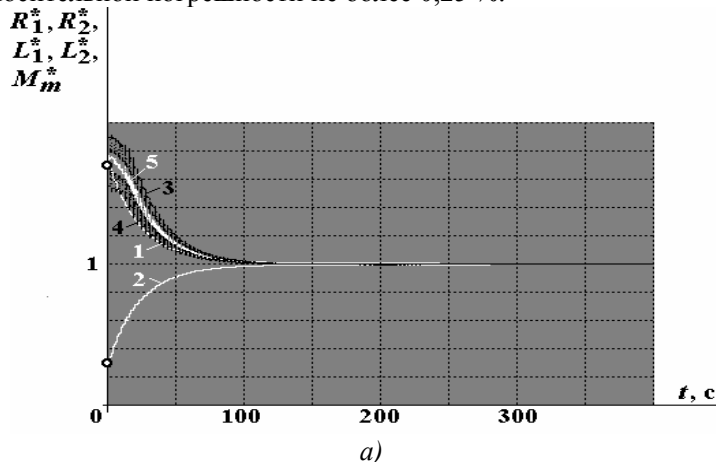
Обсуждение результатов

Анализ работоспособности, эффективности, устойчивости и точности алгоритма идентификации параметров трехфазного АД, разработанного на основе непрерывного градиентного метода, проводился с помощью компьютерного моделирования процессов идентификации. Моделирование проводилось для двигателя типа АИР80А6У2 при начальных отклонениях оценок всех параметров от истинных значений на 50 и 75 %. В каждом из рассматриваемых случаев начальные отклонения оценок параметров R_2 , J_Σ и M_c принимались на 50 и 75 % меньше истинных значений, а начальные отклонения оценок параметров R_1 , L_1 , L_2 , M_m – на 50 и 75 % больше истинных значений. На рис. 5 показаны кривые процессов идентификации при начальном отклонении оценок всех параметров от истинных значений на 75 %. Для графического представления результатов идентификации на рис. 5 введены относительные оценки параметров, которые обозначены цифрами от 1 до 7 и определяются следующими соотношениями:

$$1 - R_1^* = \frac{R_1}{R_{10}}; \quad 2 - L_1^* = \frac{L_1}{L_{10}}; \quad 3 - R_2^* = \frac{R_2}{R_{20}}; \quad 4 - L_2^* = \frac{L_2}{L_{20}};$$

$$5 - M_m^* = \frac{M_m}{M_{m0}}; \quad 6 - J_\Sigma^* = \frac{J_\Sigma}{J_{\Sigma 0}}; \quad 7 - M_c^* = \frac{M_c}{M_{c0}}.$$

Начальные отклонения оценок параметров на рис. 5 отмечены точками. Видно, что после завершения процессов идентификации графики $R_1^*(t)$, $L_1^*(t)$, $R_2^*(t)$, $L_2^*(t)$, $M_m^*(t)$, $J_\Sigma^*(t)$ и $M_c^*(t)$ выходят на уровень, соответствующий единице. Это свидетельствует о достижении всеми параметрами значений, близких к истинным, и устойчивости метода. Длительность процессов идентификации при начальном отклонении оценок всех параметров от истинных значений на 50 % составила 170 с при относительной погрешности не более 0,32 %, а при начальном отклонении на 75 % – 280 с при относительной погрешности не более 0,25 %.



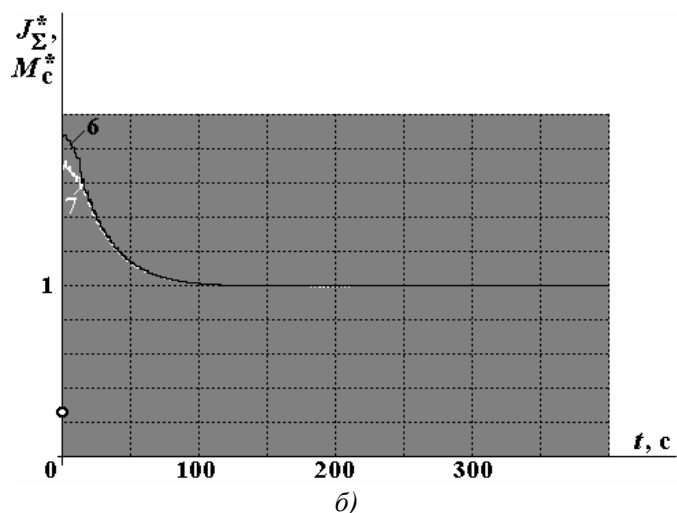


Рис. 5. Процессы идентификации при начальном отклонении всех параметров на 75 %: *a* – параметры схемы замещения фазы АД; *б* – параметры нагрузки АД

При компьютерном моделировании процессов идентификации параметров непрерывным градиентным методом проведен целый ряд вычислительных экспериментов не только для двигателя АИР80А6У2, но для АД других типов. С помощью компьютерного моделирования установлено подобие процессов идентификации приведенным на рис. 5 для разных типов АД и не установлено наличие локальных минимумов. При идентификации в n -мерном пространстве параметров наблюдается быстрый спуск на m -мерном многообразии (где $m < n$) и далее – медленное движение к глобальному минимуму.

Таким образом, компьютерное моделирование подтвердило эффективность, устойчивость и высокую точность непрерывного градиентного метода идентификации параметров трехфазного АД, а также работоспособность разработанного устройства идентификации. Недостатком предлагаемого устройства идентификации параметров является необходимость использования АД со встроенными датчиками Холла, что увеличивает его стоимость.

Выводы

1. Для эффективного управления асинхронным двигателем, работающим в составе частотно-регулируемого электропривода, необходимо осуществлять оценку (идентификацию) текущих значений параметров схемы замещения фазы и нагрузки. Идентификацию параметров трехфазного асинхронного двигателя целесообразно проводить с использованием непрерывного градиентного метода поиска минимума функции.

2. С использованием непрерывного градиентного метода поиска минимума функции разработана математическая модель системы идентификации следующих параметров: активных сопротивлений фаз обмоток статора и ротора, индуктивностей фаз обмоток статора и ротора, взаимной индуктивности, суммарного момента инерции подвижных частей и статического момента.

3. На основании математической модели системы идентификации параметров обобщенной машины разработаны структурная и функциональная схемы устройства идентификации. Показано, что устройство идентификации может быть реализовано с использованием простых элементов, таких как перемножители, сумматоры и интеграторы.

4. Компьютерное моделирование подтвердило работоспособность, высокую точность и эффективность предлагаемого метода идентификации и разработанного на его основе алгоритма.

Summary

The analysis methods to identify the parameters of automatic systems and electric motors is performed. It is shown that for the identification of the parameters of three-phase induction motor is advisable to use a continuous gradient method for finding the minimum of a function. A mathematical model of the system of identification of parameters of the induction motor is given. Developed the functional diagram of the device identification. Shown that the device identification can be realized using simple components such as multiplier, adders and integrators.

Keywords: *identification of parameters, Gradient a method of search of a minimum of function, Asynchronous Three-Phase Motor, Generalised Electric Machine.*

Литература

1. Сейдж Э. П., Мелса Д. Л. Идентификация систем управления. М.: Наука, 1974. 248 с.
2. Гроп Д. Методы идентификации систем. М.: Мир, 1979. 304 с.
3. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5 т. Т.2: Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления / Под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 640 с.
4. Вольдек А. И. Электрические машины. М.: Энергия, 1974. 340 с.
5. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. М.: Энергия, 1980. 928 с.
6. Кацман М. М. Электрические машины. М.: Академия, 2001. 463 с.
7. Артишевская С. В. Экспериментально-аналитический метод определения параметров асинхронных машин // Электричество. 1999. № 11. С. 29 – 31.
8. Мощинский Ю. А. Определение параметров схемы замещения асинхронных машин по каталожным данным // Электричество. 1998. № 4. С. 38 – 42.
9. Водовозов А. М., Елюков А. С. Идентификация параметров асинхронной машины в установившихся режимах // Вестник ИГЭУ. 2010. № 2. С. 69 – 71.
10. Изосимов Д. Б., Рывкин С. Е. Идентификация частоты вращения и составляющих потокосцепления ротора асинхронного двигателя по измерениям токов и напряжений обмоток статора // Электричество. 2005. № 4. С. 32 – 40.
11. Изосимов Д. Б., Аболев Е. Н. Свойства уравнений обобщенного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором // Электричество. 2008. № 4. С. 35 – 39.
12. Виноградов А. Б., Сибирцев А. В., Колодин И. П. Адаптивно-векторная система управления бездатчикового электропривода серии ЭПВ // Силовая электроника. 2008. № 3. С. 50 – 55.
13. Панкратов В. В., Маслов М. О. Синтез и исследование алгоритма идентификации частоты вращения асинхронного двигателя // Электричество. 2008. № 4. С. 27 – 34.
14. Каширских В. Г. Динамическая идентификация асинхронных электродвигателей. Кемерово: Куз. ГТУ, 2005. 139 с.
15. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: ИГЭУ им. В. И. Ленина, 2008. 320 с.
16. Патент № 2030088 (РФ), 6 Н 02 Р 5/06. Устройство оценивания параметров электродвигателя / Афанасьев А. Ю., Тарасова И. Т. Опубл. 27.02.1995, Бюл. № 6.
17. Афанасьев А. Ю. Моментный электропривод. Казань: Казан. гос. техн. ун-т, 1997. 250 с.
18. Макаров В. Г. Идентификация параметров трехфазного асинхронного двигателя // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2010. №3 – 4. С. 88 – 101.
19. Макаров В. Г. Идентификация параметров и токов ротора трехфазного асинхронного двигателя // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2010. №7 – 8. С. 101 – 116.

20. Пат. 2392731 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 7/06. Устройство оценивания параметров электродвигателя / Макаров В. Г., Афанасьев А. Ю., Яковлев Ю. А.; заявитель и патентообладатель Казанский государственный технологический университет – №2009118685/09; заявл. 18.05.2009; опубл. 20.06.2010. Бюл. № 17. 21 с.

21. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа, 2001. 327 с.

22. Уайт Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. Л.: Энергия, 1964. 527с.

23. Ключев В. И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.

24. Макаров В. Г. Применение теории обобщенной электрической машины к трехфазному асинхронному двигателю // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2009. № 11 – 12. С. 84 – 97.

25. Макаров В. Г. Гипотетическая физическая модель обобщенной электрической машины на основе трехфазного асинхронного двигателя//Известия вузов. Проблемы энергетики. 2010. № 1 – 2. С. 94 – 108.

Поступила в редакцию

28 января 2015 г.

Афанасьев Анатолий Юрьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электрооборудование» Казанского национального исследовательского технического университета (КНИТУ)–КАИ им. А.Н. Туполева. Тел: 8(843)236-56-53.

Макаров Валерий Ганнадьевич – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и электротехника» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ). Тел: 8(843)231-41-27. E-mail: electroprivod@list.ru.

Яковлев Юрий Алексеевич – аспирант кафедры «Электропривод и электротехника» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ). Тел: 8(927)402-58-95.

Ханнанова Вероника Николаевна – аспирант кафедры «Электропривод и электротехника» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ). Тел: 8(987)067-40-17.