

УДК 621.313.333

**АЛГОРИТМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ И ЕГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ****Д. С. Однолько**Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65, г. Минск, 220013, Беларусь. E-mail: odnolkod@tut.by

Разработана совокупность методов для оценки электромагнитных параметров асинхронных двигателей при неподвижном роторе, и синтезирован алгоритм параметрической идентификации асинхронных двигателей в составе электропривода в режиме реального времени. Задача решена для математической модели асинхронных двигателей, представленной в неподвижной системе координат статора  $\alpha$ - $\beta$ . Алгоритм основан на применении метода наименьших квадратов, обеспечивающего более высокую точность оценки параметров схемы замещения и удобную интеграцию в программное обеспечение современного электропривода. Результаты экспериментов свидетельствуют о работоспособности предложенного алгоритма и важности параметрической идентификации асинхронных двигателей в системах бездатчикового электропривода.

**Ключевые слова:** электропривод, асинхронный двигатель, параметрическая идентификация, метод наименьших квадратов.

**АЛГОРИТМ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ТА ЙОГО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ТЕСТУВАННЯ****Д. С. Однолько**Білоруський національний технічний університет  
просп. Незалежності, 65, м. Мінськ, 220013, Білорусь. E-mail: odnolkod@tut.by

Розроблено сукупність методів для оцінювання електромагнітних параметрів асинхронних двигунів при нерухомому роторі та синтезований алгоритм параметричної ідентифікації асинхронних двигунів у складі електроприводу у режимі реального часу. Задачу розв'язано для математичної моделі асинхронних двигунів, приведеної в нерухомій системі координат статора  $\alpha$ - $\beta$ . Алгоритм ґрунтується на застосуванні методу найменших квадратів, що забезпечує більш високу точність оцінювання параметрів схеми заміщення та зручну інтеграцію в програмне забезпечення сучасного електропривода. Результати експериментів свідчать про работоспособність запропонованого алгоритма та важності параметричної ідентифікації асинхронних двигунів в системах бездатчикового електропривода.

**Ключевые слова:** электропривод, асинхронный двигатель, параметрична ідентифікація, метод найменших квадратів.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Широкое использование асинхронных двигателей (АД) в большинстве рабочих механизмов является мировой тенденцией, что обусловлено рядом преимуществ, свойственных данному типу электродвигателей [1]. Требования к повышению надежности и энергетической эффективности интенсивно внедряемого промышленного оборудования на основе электроприводов (ЭП), спроектированных по системе автономный инвертор напряжения – асинхронный двигатель (АИН–АД, далее ЭП), определяют постановку и решение научно-технических задач по созданию интеллектуальных систем автоматического управления и самодиагностирования в составе данной электро-механической системы.

Несмотря на то, что во многом качество регулирования координат ЭП определяется особенностями преобразователя и двигателя, большая роль в обеспечении требуемых регулировочных характеристик возлагается на внедрение интеллектуальных систем, призванных оперативно выполнять параметрическую идентификацию объекта управления – асинхронной машины – и автоматически корректировать настройки системы управления действующего ЭП, полагаясь при этом на уточненные значения параметров схемы замещения (СЗ) двигателя. При этом параметры могут значительно отличаться от дан-

ных, приводимых в справочной и технической документации.

Знания параметров АД важны, главным образом, для синтеза управления. Между тем, уточнение параметров в процессе работы ЭП дает важную информацию о состоянии двигателя, что может быть использовано также для оценки его работоспособности. Поэтому данная информация может быть полезна и в нерегулируемых ЭП для диагностирования их технического состояния, что способствует своевременному обнаружению неисправностей и повышению надежности технологической установки в целом.

*Анализ предыдущих исследований.* Решению проблемы определения параметров электрических машин и асинхронной машины, в частности, уделяли внимание ученые всего мира [2–6]. Разработанные специалистами методы нашли применение в комплектных ЭП известных фирм. В то же время решение задачи параметрической идентификации АД в режиме реального времени не получило на сегодняшний день общепринятого теоретического решения [2].

В рамках решения задач проектирования и эффективной эксплуатации асинхронного ЭП можно выделить три группы среди методов идентификации АД:

– методы *стендовой* идентификации АД, необходимые для решения задачи проектирования систем ЭП и экспериментального исследования режимов его работы на испытательных стендах;

– методы *предварительной* идентификации АД применяются в преобразователях частоты (ПЧ) для автоматической настройки параметров устройства управления при инициализации системы ЭП;

– методы *текущей* идентификации АД решают задачу по оценке (уточнению) электромагнитных параметров АД в процессе работы ЭП.

При этом методы предварительной и текущей идентификации наиболее перспективны.

Предварительная идентификация зачастую выполняется на основании «активных» алгоритмов – анализе реакции объекта управления на инжектированные в статор двигателя специальные тестовые воздействия [2, 5, 7, 8]. Данный подход нашел широкое применение в комплектных ЭП, и, зачастую, обеспечивает оценивание параметров СЗ асинхронной машины, питаемой от АИН в режиме формирования инвертором неподвижного вектора напряжения статора (намагничивание АД при неподвижном роторе). При этом требуется дальнейшее усовершенствование данного подхода в сторону повышения точности оценивания при сокращении общего времени идентификации.

Современное развитие микропроцессорной и измерительной техники позволяет постоянно искать новые методы и средства для повышения эффективности идентификации на базе математического аппарата и приемов программирования. Поэтому построение алгоритмов параметрической идентификации АД, работающего в условиях внешних помех, остается актуальной задачей.

Цель работы состоит в разработке совокупности методов и алгоритма для оценивания всех параметров СЗ двигателя при неподвижном роторе, обеспечивающего полную оценку параметров СЗ за один цикл намагничивания АД, что позволяет сократить время идентификации по сравнению с известными алгоритмами [5, 7, 8].

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.**  
*Математическая модель АД.* Алгоритм синтезирован на основе метода наименьших квадратов (МНК) [9], что позволяет снизить влияние шумов измерений и прочих помех в системе ЭП на качество оценивания параметров.

В предлагаемом алгоритме предварительной идентификации исходной информацией является измеряемый датчиком ток статора одной из фаз двигателя. Поэтому в качестве базовой математической модели АД принята модель в неподвижной относительно статора системе координат  $\alpha$ - $\beta$ , позволяющая уменьшить погрешность оценивания параметров, т.к. не требует координатного преобразования [1].

Учитывая, что идентификация выполняется при неподвижном роторе, модель АД можно представить в виде

$$\frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt} = -R_s i_{s\alpha} + u_{s\alpha}, \quad (1)$$

$$\sigma L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} = -R_s i_{s\alpha} - \alpha(\sigma L_s + L_m k_r) i_{s\alpha} + \alpha \Psi_{s\alpha} + u_{s\alpha}, \quad (2)$$

где  $i_{s\alpha}$ ,  $u_{s\alpha}$ ,  $\Psi_{s\alpha}$  – проекции векторов тока, напряжения и потокосцепления статора на ось  $\alpha$ ;  $\alpha_r = R_r/L_r = 1/T_r$  – величина обратная постоянной времени ротора;  $T_r$  – постоянная времени ротора;  $k_r = L_m/L_r$  – коэффициент связи ротора;  $L_r$ ,  $L_s$ ,  $L_m$  – полная индуктивность ротора, статора и цепи намагничивания;  $\sigma = 1 - L_m^2/L_s L_r$  – коэффициент рассеяния статора и ротора.

В выражение (2) входит недоступная для прямого измерения переменная  $\Psi_{s\alpha}$ , поэтому косвенное определение потокосцепления статора можно выполнить, используя разностную модель процессов в асинхронном приводе на основании (1). Наиболее простой метод получения разностного уравнения – использование приближенного метода интегрирования, считая правую часть дифференциального уравнения незначительно изменяющейся в течение цикла. Очевидно, точность такого метода тем выше, чем меньше длительность цикла  $\Delta$ . Таким образом,  $\Psi_{s\alpha}$  может быть вычислено, согласно, выражению:

$$\Psi_{s\alpha}(m) = \Psi_{s\alpha}(m-1) + \Delta(u_{s\alpha}(m) - R_s i_{s\alpha}(m)), \quad (3)$$

где  $\Delta$  – длительность цикла интегрирования;  $m$  – номер цикла интегрирования.

*Алгоритм предварительной идентификации.* Предварительная идентификация АД выполняется при неподвижном роторе. Находясь при этом в составе ЭП промышленной установки, двигатель питается от АИН с векторной ШИМ [10] в режиме формирования неподвижного вектора напряжения статора (режим намагничивания АД).

Алгоритм предусматривает:

1) определение уровня задающего сигнала по напряжению статора, поступающего на блок-векторной ШИМ и состоящего из компонент  $u_{\alpha,z}$ ,  $u_{\beta,z}$ . Компонента  $u_{\beta,z}$  имеет нулевое значение. Компонента  $u_{\alpha,z}$  представляет собой значение, фиксированное на протяжении всего намагничивания машины:

$$u_{\alpha,z} = R_{s,kat} I_\mu, \quad (4)$$

$$I_\mu = I_{s,n} \sqrt{1 - \cos \varphi_n}, \quad (5)$$

где  $I_{s,n}$  – номинальный ток статора АД;  $\cos \varphi_n$  – номинальный коэффициент мощности;  $R_{s,kat}$  – значение активного сопротивления статора, рассчитанное по паспортным данным по одной из известных методик, например [1], или взятое из каталога.

Компонента  $u_{\alpha,z}$  обеспечивает требуемую величину модуля обобщенного фазного напряжения  $U_m$  (среднее значение фазного напряжения за период ШИМ), формируемого посредством АИН:

$$U_m = \sqrt{u_{\alpha,z}^2 + u_{\beta,z}^2} = u_{\alpha,z}. \quad (6)$$

2) Формирование в течение намагничивания АД массивов данных о средних значениях фазного тока статора  $I_{sa, const}$  за каждый период ШИМ и мгновенных значениях фазного тока статора  $i_{sa}$  на интервалах проводящего и непроводящего состояний АИН. Данная информация сохраняется для последующего обращения к ней на соответствующих этапах идентифицирующего теста.

3) Формирование оценок электромагнитных параметров АД. Оценка активного сопротивления статора  $\hat{R}_s$  выполняется на основе ретроспективного варианта МНК [9] с учетом (1) для средних значений электрических величин за период ШИМ для квазиустановившегося состояния:

$$\hat{R}_s = U_m \left( \sum_{k=k_{st}}^{k_{\mu}} (I_{sa, const}^k)^2 \right)^{-1} \left( \sum_{k=k_{st}}^{k_{\mu}} I_{sa, const}^k \right), \quad (7)$$

где  $I_{sa, const}^k$  – элементы матрицы  $I_{sa, const}^{1 \times k_{\mu}}$ ,  $k \in [(k_{\mu} - k_{st}), k_{\mu}]$ ;  $I_{sa, const}^{1 \times k_{\mu}}$  – матрица-строка, каждый элемент которой представляет собой среднее значение фазного тока статора за период ШИМ;  $k_{\mu}$  – количество периодов ШИМ, прошедших в течение намагничивания двигателя;  $k_{st}$  – количество периодов ШИМ, прошедших до момента достижения квазиустановившегося значения фазного тока.

Оценку индуктивности рассеяния предложено выполнять с применением ретроспективного варианта МНК на основании (1) с учетом допущений [8], соответствующих проводящему состоянию АИН с ШИМ при неподвижном роторе

$$\hat{\sigma L}_s = 2\Delta t \cdot u_{sa, u1} \frac{\sum_{j=1}^{k_{U1}} \sum_{\xi_{U1}=2}^{(k_{\xi, U1}-1)} (i_{sa}^{j, (\xi_{U1}+1)} - i_{sa}^{j, (\xi_{U1}-1)})}{\sum_{j=1}^{k_{U1}} \sum_{\xi_{U1}=2}^{(k_{\xi, U1}-1)} (i_{sa}^{j, (\xi_{U1}+1)} - i_{sa}^{j, (\xi_{U1}-1)})^2}, \quad (8)$$

где  $i_{sa}^{j, \xi_{U1}}$  – элементы матрицы  $i_{sa}^{k_{U1} \times k_{\xi, U1}}$ ;  $i_{sa}^{k_{U1} \times k_{\xi, U1}}$  – матрица мгновенных значений тока статора фазы  $\alpha$  на интервалах выборки  $\xi_{U1}$ , соответствующих проводящим состояниям АИН в течение намагничивания двигателя;  $k_{U1}$  – количество интервалов включения базового вектора  $U_1$  (проводящих состояний АИН);  $k_{\xi, U1}$  – количество выборок  $\xi_{U1}$ , соответствующих  $j$ -ому интервалу включения базового вектора  $U_1$ ,  $\xi_{U1} \in [1, k_{\xi, U1}]$ ,  $j \in [1, k_{U1}]$ ;  $\Delta t$  – интервал времени между выборками тока;  $u_{sa, u1}$  – мгновенное значение напряжения фазы  $\alpha$  на интервалах проводящего состояния АИН ( $u_{sa, u1} = 2U_{dc}/3$ );  $U_{dc}$  – напряжение звена постоянного тока.

Для определения полной индуктивности статора  $L_s$  можно воспользоваться зависимостями

$$\hat{L}_s = \Psi_{sa, const}^{k_{st}} / I_{sa, const}^{k_{st}}, \quad (9)$$

$$\Psi_{sa, const}^{k_{st}} = T \sum_{k=1}^{k_{st}} \left( U_m - \hat{R}_s I_{sa, const}^k \right), \quad (10)$$

где  $\Psi_{sa, const}^{k_{st}}$ ,  $I_{sa, const}^{k_{st}}$  – средние значения потокосцепления и тока статора, соответствующие периоду ШИМ в момент достижения током статора квазиустановившегося значения ( $I_{sa, const}^{k_{st}} \square I_{sa, const}^{1 \times k_{\mu}}$ );  $T$  – период ШИМ.

Оценка полной индуктивности ротора  $\hat{L}_r$  определяется согласно допущению  $\hat{L}_r \approx \hat{L}_s$  [2]. Для определения оценки взаимной индуктивности  $\hat{L}_m$  можно воспользоваться типовым выражением

$$\hat{L}_m = \hat{L}_s - \hat{L}_{s\sigma}, \quad (11)$$

где  $\hat{L}_{s\sigma} \approx \hat{L}_{r\sigma} \approx \sigma \hat{L}_s / 2$ , – индуктивности рассеяния статора и ротора.

Для оценивания постоянной времени и активного сопротивления ротора разработано два метода. Согласно *первому*, оценивание выполняется с учетом (1), (2) на интервале непроводящего состояния инвертора при «включенном» нулевом базовом векторе  $U_0$  или  $U_7$  (напряжение на входе АД равно нулю). Оценивание выполняется на основе рекуррентного варианта МНК (формируется последовательность оценок) [9], что более эффективно для оценивания параметров, влияние которых проявляется в переходных процессах

$$\begin{cases} \hat{\alpha}_{r, \xi_{U7, j}} = \hat{\alpha}_{r, (\xi_{U7}-1), j} + (F_{\xi_{U7, j}})^{-1} z_{\xi_{U7, j}} \times \\ \times (y_{\xi_{U7, j}} - z_{\xi_{U7, j}} \hat{\alpha}_{r, (\xi_{U7}-1), j}) \\ F_{\xi_{U7, j}} = F_{(\xi_{U7}-1), j} + z_{\xi_{U7, j}}^2, \\ y_{\xi_{U7, j}} = -\sigma \hat{L}_s \left[ \frac{(i_{sa}^{j, (\xi_{U7}+1)} - 2i_{sa}^{j, \xi_{U7}} + i_{sa}^{j, (\xi_{U7}-1)})}{\Delta t^2} \right] - \\ - \hat{R}_s \left[ \frac{(i_{sa}^{j, (\xi_{U7}+1)} - i_{sa}^{j, (\xi_{U7}-1)})}{2\Delta t} \right], \\ z_{\xi_{U7, j}} = \hat{R}_s i_{sa}^{j, \xi_{U7}} + \hat{L}_s \left[ \frac{(i_{sa}^{j, (\xi_{U7}+1)} - i_{sa}^{j, (\xi_{U7}-1)})}{2\Delta t} \right], \end{cases} \quad (12)$$

где  $\hat{\alpha}_{r, \xi_{U7, j}}$  – величина обратная постоянной времени ротора на  $j$ -ом интервале непроводящего состояния инвертора на  $\xi_{U7}$  шаге вычислений;  $i_{sa}^{j, \xi_{U7}}$  – элементы матрицы  $i_{sa}^{k_{U7} \times k_{\xi, U7}}$ , которая формируется аналогично матрице  $i_{sa}^{k_{U1} \times k_{\xi, U1}}$  и содержит информацию о мгновенных значениях тока статора фазы  $\alpha$  на интервалах непроводящего состояния инвертора.

На каждом шаге вычислений  $\xi_{U7}$  дополнительно определяется квадрат ошибки оценивания  $E^2(\hat{\alpha}_{r, \xi_{U7, j}}, y_{\xi_{U7, j}})$  для полученного значения  $\hat{\alpha}_{r, \xi_{U7, j}}$

$$E^2(\hat{\alpha}_{r, \xi_{U7, j}}, y_{\xi_{U7, j}}) = (y_{\xi_{U7, j}} - z_{\xi_{U7, j}} \hat{\alpha}_{r, \xi_{U7, j}})^2. \quad (13)$$

Установлено, что по мере затухания переходного процесса, использование соответствующих такому моменту времени элементов последовательности  $y_{\xi_{U7},j}$  приводит к несоблюдению условия

$$E^2(\hat{\alpha}_{r_{\xi_{U7},j}}, y_{\xi_{U7},j}) < E^2(\hat{\alpha}_{r_{(\xi_{U7-1}),j}}, y_{(\xi_{U7-1}),j}). \quad (14)$$

Поэтому в качестве результата оценивания по рекуррентному МНК (12) следует принимать последнее, удовлетворяющее условию (14), значение  $\hat{\alpha}_{r_{\xi_{U7},j}}$ .

На основании оценок параметра  $\alpha_r$  полученных на  $k_{U7}$  интервалах непроводящего состояния инвертора определяется результирующая оценка  $\hat{\alpha}_r$ ,

$$\hat{\alpha}_r = (1/k_{U7}) \sum_{j=1}^{k_{U7}} \hat{\alpha}_{r_j}. \quad (15)$$

Тогда оцененное значение постоянной времени ротора с учетом (15)  $\hat{T}_r = 1/\hat{\alpha}_r$ . Оценка активного сопротивления ротора  $\hat{R}_r = \hat{L}_r \hat{\alpha}_r$ .

В рамках *второго* метода на основании выражений (2), (3) для неподвижного ротора АД с учетом средних значений электрических величин на периоде ШИМ для  $k$ -го периода ШИМ получено выражение

$$\hat{\sigma}L_s \left( \frac{\Delta I_{sa.const}^k}{\Delta t} \right) = -\hat{R}_s I_{sa.const}^k - \hat{\alpha}_r (\hat{\sigma}L_s + \hat{L}_m \hat{k}_r) I_{sa.const}^k + \hat{\alpha}_r \Psi_{sa.const}^k + U_m, \quad (16)$$

где  $\Psi_{sa.const}^k = \Psi_{sa.const}^{(k-1)} + T(U_m - \hat{R}_s I_{sa.const}^k)$  – среднее значения потокосцепления статора на  $k$ -ом

периоде ШИМ ( $\Psi_{sa.const}^0 = 0, I_{sa.const}^k \in I_{sa.const}^{1 \times k_u}$ ).

С учетом рекуррентного варианта МНК на основании (16)

$$\begin{cases} \hat{\alpha}_{r_k} = \hat{\alpha}_{r_{(k-1)}} + (F_k)^{-1} z_k (y_k - z_k \hat{\alpha}_{r_{(k-1)}}) \\ F_k = F_{(k-1)} + z_k^2 \\ y_k = \hat{\sigma}L_s \left( \frac{(I_{sa.const}^{(k+1)} - I_{sa.const}^{(k-1)})}{2T} \right) + \hat{R}_s I_{sa.const}^k - U_m \\ z_k = \Psi_{sa.const}^k - \left( \hat{\sigma}L_s + \hat{L}_m \hat{k}_r \right) I_{sa.const}^k \\ \Psi_{sa.const}^k = \Psi_{sa.const}^{(k-1)} + T(U_m - \hat{R}_s I_{sa.const}^k) \end{cases} \quad (17)$$

Выбор итоговой оценки  $\hat{\alpha}_r$  среди оценок, получаемых последовательно по рекуррентному алго-

ритму (17), выполняется по аналогичному (14) условию.

Разработанный алгоритм предварительной идентификации АД обладает более высоким быстродействием по сравнению с [5, 7, 8], т.к. выполняется в течение однократного намагничивания АД. Для повышения точности оценивания параметров используются различные варианты МНК, которые позволяют снизить влияние шумов измерений и прочих помех в системе ЭП на качество оценивания параметров. Отсутствует произвол в настройке алгоритма оценивания и выборе характеристик тестового сигнала, а также используется максимально доступный объем информации о токе статора, обработка которого позволяет оценить параметры с более высокой степенью точности.

*Тестирование алгоритма идентификации.* Экспериментальное тестирование выполнено на лабораторном макете на базе лаборатории отдела электрооборудования предприятия «НТЩ «Белкоммунмаш». Макет представляет собой комплектный ЭП с векторным микропроцессорным управлением, нагрузочным агрегатом и информационно-измерительной частью (рис. 1).

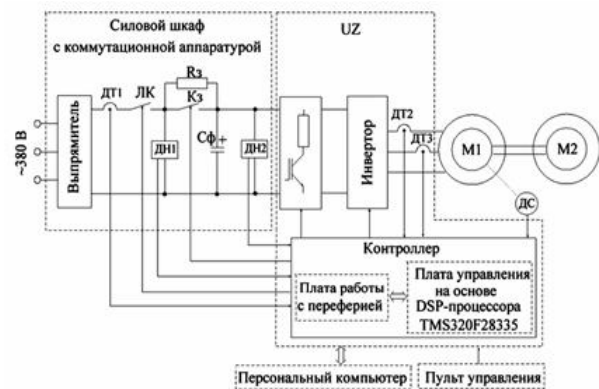


Рисунок 1 – Функциональная схема лабораторного макета

На схеме приняты обозначения: ДТ1 – датчик тока сети; ЛК – линейный контактор; ДН1 – датчик напряжения сети; ДН2 – датчик напряжения фильтра; Кз – контактор заряда фильтра; Rз – зарядный резистор; Сф – фильтр; ДТ2, ДТ3 – датчики фазного тока АД; UZ – преобразователь; ДС – датчик скорости; M1, M2 – асинхронные машины.

Испытуемой электрической машинной является АД модели АИР90L4У3. Двигатель питается от АИН, управление которым осуществляется при помощи микроконтроллера по закону векторной ШИМ.

Программа экспериментальных исследований предполагает оценивание всех электромагнитных параметров СЗ двигателя АИР90L4У3 в режиме неподвижного ротора программными средствами, используя базовые возможности ЭП. Вначале идентифицирующий тест проводится для холодного двигателя. Одновременно с процессом идентификации в управляющем микроконтроллере определяются параметры СЗ расчетным методом согласно [1]. Затем система

бездатчикового векторного управління АД використовує оцінені параметри, отримані в результаті ідентифікації. Двигатель разгоняється до швидкості вище синхронної. Після 20 хвилин роботи двигатель зупиняється, і виконується повторна оцінка параметрів. Отримані по результатах ідентифікації параметри АД порівнюються з паспортними даними, з менше ніж 10-ти відсотковим відхиленням, за винятком повної індуктивності розсіяння, відхилення якої складалося близько 50 %.

Загальне час намагнічування АД, включаючи досягнення квазіусталовившогося стану і його підтримку, складало 1,2 секунди. Після цього двигатель відключався, і на основі збереженого масиву даних про струм статора фази  $\alpha$  в мікроконтролері виконувалося оцінювання параметрів АД, яке займало менше ніж 0,01 с.

На рис. 2 представлені осцилограми зміни середнього значення фазного струму за час намагнічування АД. На рис. 3 представлена осцилограма зміни миттєвого значення фазного струму за період ШІМ. Як видно, вимірювання миттєвого значення струму супроводжуються явно вираженими поємками.

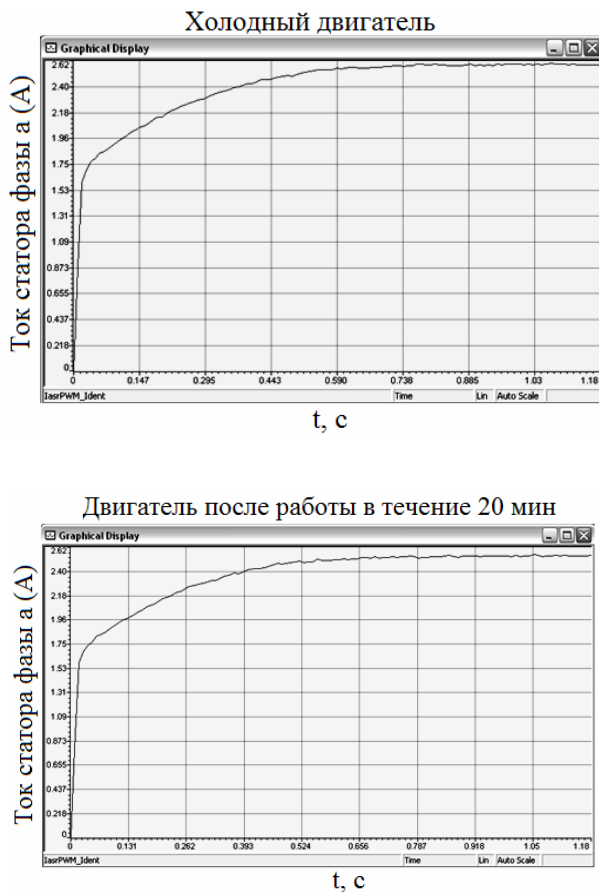


Рисунок 2 – Осцилограма зміни середнього значення струму статора фази  $\alpha$  за час намагнічування двигателя при  $f=0,1$  кГц,  $U_{dc}=580$  В і  $U_m=9,1$  В

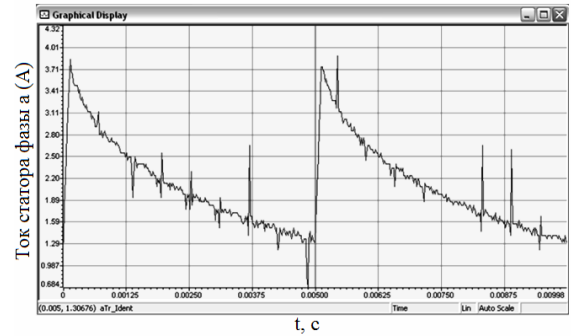


Рисунок 3 – Осцилограма зміни миттєвого значення фазного струму за період ШІМ після досягнення квазіусталовившогося стану в режимі намагнічування двигателя при  $f=0,1$  кГц,  $U_{dc}=580$  В і  $U_m=9,1$  В

Використання результатів попередньої ідентифікації АД для налагодки системи бездатчикового векторного управління забезпечило її роботоздатність, як в режимі розгону, так і гальмування, що підтверджує близькість оцінених значень параметрів СЗ їх дійсним значенням. Досліджуваний алгоритм ідентифікації в даний час експлуатується в вигляді окремого програмного модуля в лабораторному макеті тягового ЕП.

#### ВИВОДИ.

1. Предложено совокупность методов определения электромагнитных параметров АД при неподвижном роторе и алгоритм предварительной идентификации АД в составе частотно-регулируемого ЭП, обеспечивающий совместную оценку параметров за один цикл намагнічування двигателя и реализуемый программными средствами ЭП на основании МНК и анализа мгновенных значений токов одной из фаз статора.

2. Установлено, что для оценивания электромагнитных параметров АД при известном его математическом описании, дефиците априорной информации и необходимости построения модели идентификатора удобной в настройке и робастной в отношении поємок наиболее предпочтительным является МНК.

3. Результаты эксперимента подтвердили работоспособность предложенного алгоритма и возможность оценки всех параметров СЗ асинхронной машины в составе ЭП за время намагнічування АД при неподвижном роторе, что обеспечивает более быструю предварительную идентификацию АД по сравнению с известными алгоритмами [5, 7, 8].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Теория электропривода. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 585 с.
2. Пересада С.М., Ковбаса С.Н., Малько М.П. Робастный алгоритм идентификации параметров асинхронного двигателя при неподвижном роторе // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – 2010. – Вип. 3/2010 (62), част. 1. – С. 121–124.
3. Ромашихин Ю.В., Родькин Д.И., Калинов А.П. Энергетический метод идентификации пара-

метров асинхронных двигателей // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – 2007. – Вип. 3/2007 (44), част. 2. – С. 130–136.

4. Изосимов Д.Б. Экспериментальное определение параметров асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором // Электротехника. – 2013. – № 2. – С. 29–37.

5. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. – Иваново: ГОУВПО Ивановский государ. энергетический ун-т им. В.И. Ленина, 2008. – 298 с.

6. Stephan J., Bodson M., Chiasson J. Real-time estimation of induction motor parameters // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1994. – Vol. 30, №

3. – PP. 746–759.

7. Козьярук А.Е., Рудаков А.Г. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов. – СПб.: Санкт-Петербургская Электротехническая компания, 2004. – 127 с.

8. Пивняк Г.Г., Волков А.В. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией: монография. – Днепропетровск, 2006. – 470 с.

9. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. – М.: Мир, 1975. – 688 с.

10. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.

### ALGORITHM FOR PARAMETRIC IDENTIFICATION OF INDUCTION MOTORS AND ITS EXPERIMENTAL TESTING

**D. Adnolka**

Belarusian National Technical University

prosp. Nezavisimosti 65, Minsk, 220013, Belarus. E-mail: odnolkod@tut.by

The author has developed the combination of methods for induction motors electromagnetic parameters estimation. These methods provide parameter estimation for fixed rotor. The algorithm of online identification of induction motor as a part of electric drive is synthesized. The fast parameters estimation is archived by preprocessing of the stator current data massive. This information is saved in the identification block for further accessing data at appropriate stages of the identification test. The parameter identification is performed using the motor control basic hardware tools. The induction motor electromagnetic processes are defined in *b-c* fixed frame equations, and these equations are used for parameters estimation. The algorithm offered is based on the recurrent and retrospective interpretations of the least squares method and provides high accuracy. This algorithm can be easily integrated into the software implemented in modern electric drive. The experimental tests conducted have confirmed the efficiency of the proposed online identification algorithm and the importance of the parametric identification of induction motor in sensorless control systems.

**Key words:** electric drive, induction motor, online identification, the method of the least squares.

#### REFERENCES

1. Firago, B.I. and Pavlyachik, L.B. (2007), *Teoriya elektroprivoda* [Theory of electric drive], *Tehnoperspektiva*, Minsk, Belarus.

2. Peresada, S.M., Kovbasa, S.N. and Malko, M. (2010), "Robust Identification of the Induction Motor Parameters under Fixed Rotor", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, vol. 3, no. 62, part 1, pp. 121–124.

3. Romashihin, Y.V., Rodkin, D.I. and Kalinov, A.P. (2007), "The energy method for parameter identification of induction motors", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, vol. 3, no. 44, part 2, pp. 130–136.

4. Izosimov, D.B. (2013), "Experimental determination of the parameters of an induction motor with squirrel-cage rotor", *Electrical Engineering*, no. 2, pp. 29–37.

5. Vinogradov, A.B. (2008), *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka* [Vector Control AC Drives], State Educational Institution of Higher Professional Education Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin, Ivanovo, Russia.

6. Stephan, J., Bodson, M. and Chiasson, J. (1994), "Real-time estimation of induction motor parameters", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 30, no. 3, pp. 746–759.

7. Kozyaruk, A.E. and Rudakov, A.G. (2004),

*Sovremennoe i perspektivnoe algoritmicheskoe obespechenie chastotno-reguliruemyykh elektroprivodov* [Current and future algorithmic support of variable frequency drives], St. Petersburg Electrotechnical Company, St. Petersburg, Russia.

8. Pivnyak, G.G. and Volkov, A.V. (2006), *Sovremennyye chastotno-reguliruemyye asinhronnyye elektroprivody s shirotno-impulsnoy modulyatsiey* [Modern variable frequency induction motor electric drive with pulse-width modulation], National Mining University, Dnepropetrovsk, Ukraine.

9. Eykhoff, P. (1975), *Osnovy identifikatsii sistem upravleniya* [Basics of identification control systems], Mir, Moscow, Russia.

10. Sokolovskiy, G.G. (2006), *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [AC drives with frequency regulation], Akademiya, Moscow, Russia.

Стаття надійшла 18.07.2013.