

А. П. КАЛИНОВ, канд. техн. наук, доц., Кременчугский национальный университет;
В. А. ОГАРЬ, канд. техн. наук, доц., Кременчугский национальный университет;
В. В. ЛОТОУС, аспирант, Кременчугский национальный университет.

МЕТОД КОСВЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ НА ВАЛУ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Введение. По оценкам ряда исследователей [1], электродвигатели (ЭД) потребляют до 46% электроэнергии во всем мире. На сегодняшний день одним из основных мероприятий по повышению энергоэффективности электропривода (ЭП) является использование преобразователей частоты (ПЧ) для возможности регулирования частоты вращения ЭД переменного тока. Область применения регулируемых ЭП переменного тока достаточно широка: от мощных энергоемких механизмов и электротранспорта до прецизионных систем автоматизации и бытовой техники. Использование регулируемых ЭП переменного тока позволяет снизить потребление электроэнергии на 10÷50% и, благодаря исключению динамических ударов и пусковых перегрузок, улучшить условия работы двигателей и механизмов.

Постановка задачи. Реализация энергосберегающих режимов в регулируемом ЭП возможна при условии мониторинга основных энергетических показателей, для определения которых необходима информация о выходных механических параметрах двигателя: мощности и моменте на валу. Также в практике эксплуатации ЭП существует целый ряд задач, требующий определения энергетических показателей и механических характеристик АД, а именно:

- определение фактической нагрузки ЭП в длительных и циклических режимах работы;
- мониторинг параметров и косвенный расчет переменных и регулируемых координат в системах управления ПЧ;
- диагностика состояния АД по величине потерь в узлах АД и частотному анализу входной мощности [2,3]
- испытания под нагрузкой новых и отремонтированных АД;
- отказоустойчивое управление частотно-регулируемых ЭП со скалярным [4] и векторным управлением [5]

В условиях испытательных станций и исследовательских лабораторий определение момента и мощности на валу возможно с использованием датчиков момента [6], а также косвенными методами с использованием опытов холостого хода и короткого замыкания [7, 8]. В ЭП технологических механизмов без демонтажа АД определение этих показателей возможно только косвенными методами без использования дополнительных источников формирования тестовых воздействий.

В ряде исследований [9, 10] авторы предлагают достаточно сложные математические зависимости с введением дополнительных коэффициентов, которые не всегда являются известными. Для реализации других методов расчета мощности на валу и энергетических показателей необходимы данные о параметрах схемы замещения (СЗ). При этом необходимость интегрирования потокосцеплений может вызывать накопление ошибки интегрирования.

Использование встроенных в ПЧ функций автонастройки на параметры конкретного АД позволяет существенно расширить возможности определения мощности на валу и энергетических показателей АД. Это достигается за счет определения параметров СЗ и составляющих постоянных потерь при работе в режиме вращения с разными значениями величин питающего напряжения. Большинство современных ПЧ имеют функцию косвенного определения мощности и момента на валу двигателя. При этом обычно используются упрощенные расчетные зависимости, у которых погрешность даже в номинальном режиме может составлять до 10%.

Цель работы. Разработка метода определения мощности на валу асинхронного двигателя и экспериментальная оценка его точности.

Материалы исследований. При разработке метода определения мощности на валу АД и его энергетических показателей в отсутствие информации о параметрах двигателя принимаются допущения о возможности: а) проведения измерений при работе в режимах холостого хода и под нагрузкой (номинальной или близкой к ней); б) измерения активных сопротивлений фаз статора в практически холодном и в нагретом состоянии; в) измерения токов и напряжений фаз статора и измерение угловой частоты вращения ротора. Основная идея метода заключается в использовании режима холостого хода для определения постоянных потерь двигателя без их разделения на потери в стали и потери в механических узлах. Определенные таким методом постоянные потери используются в дальнейшем при расчете мощности на валу АД при работе под нагрузкой.

Известно, что мощность на валу АД возможно определить из уравнения баланса мощностей [6]. В общем случае баланс можно представить с использованием мгновенных значений составляющих мощности:

$$p_2(t) = p_{эм}(t)(1 - s(t)) - \Delta p_{мех} - \Delta p_{доп}(t), \quad (1)$$

где $p_{эм}(t)$ – электромагнитная мощность; $\Delta p_{мех}$ – механические потери; $\Delta p_{доп}(t)$ – дополнительные потери; $s(t)$ – скольжение.

Электромагнитная мощность при этом равна:

$$p_{эм}(t) = p_1(t) - \Delta p_{м1}(t) - \Delta p_{ст}(t), \quad (2)$$

где $p_1(t) = u_A(t)i_A(t) + u_B(t)i_B(t) + u_C(t)i_C(t)$ – потребляемая мощность; $\Delta P_{m1}(t)$ – потери в меди статора; $\Delta P_{cr}(t)$ – потери в стали; $u_A(t), u_B(t), u_C(t), i_A(t), i_B(t), i_C(t)$ – напряжения и токи соответствующих фаз статора.

Тогда с учетом (2) мощность на валу:

$$p_2(t) = p_1(t) - \Delta p_{mex}(t) - \Delta p_{доп}(t) - \Delta p_{m1}(t) - \Delta p_{cr}(t) - p_1(t)s(t) + s(t)[\Delta p_{m1}(t) + \Delta p_{cr}(t)]. \quad (3)$$

Исследования выражения (3) для широкого диапазона мощностей общепромышленных АД показали, что составляющей $s(t)[\Delta P_{m1}(t) + \Delta P_{cr}(t)]$ можно пренебречь, поскольку она является незначительной по сравнению с другими составляющими. Так для АД средней и большой мощности в установившемся режиме работы с номинальным скольжением, составляющая $(s[\Delta P_{m1}(t) + \Delta P_{cr}(t)]) / P_1 \cdot 100\% \leq 1\%$, где P_1 – среднее значение от $\Delta P_1(t)$, ΔP_{m1} – среднее значение от $\Delta P_{m1}(t)$ и ΔP_{cr} – среднее значение от $\Delta P_{cr}(t)$, (табл. 1). Таким образом, мощность на валу АД можно представить:

$$p_2(t) = p_1(t) - \Delta p_{mex}(t) - \Delta p_{доп}(t) - \Delta p_{m1}(t) - \Delta p_{cm}(t) - p_1(t)s(t). \quad (4)$$

Составляющие выражения (4) можно выразить через мощность холостого хода, поскольку вся потребляемая мощность в этом режиме используется на потери в узлах двигателя:

$$p_{1xx}(t) = \Delta p_{xx}(t) = \Delta p_{mex}(t) + \Delta p_{доп}(t) + \Delta p_{cm}(t) + \Delta p_{m1xx}(t) \quad (5)$$

где $\Delta p_{m1xx}(t) = i_{Axx}^2(t)R_A + i_{Bxx}^2(t)R_B + i_{Cxx}^2(t)R_C$ – электрические потери в меди статора на холостом ходу; $i_{Axx}(t), i_{Bxx}(t), i_{Cxx}(t)$ – токи соответствующих фаз статора в режиме холостого хода; R_A, R_B, R_C – активные сопротивления соответствующих фаз статора.

Принимается допущение, что все составляющие выражения (5), кроме потерь в меди статора, являются постоянными и не зависят от нагрузки. Тогда, на основе вышеописанного, и зная мгновенную потребляемую мощность на холостом ходу:

$$p_{1xx}(t) = u_{Axx}(t)i_{Axx}(t) + u_{Bxx}(t)i_{Bxx}(t) + u_{Cxx}(t)i_{Cxx}(t). \quad (6)$$

которая рассчитывается по мгновенным значениям напряжений и токов статора АД, можно записать выражение для постоянных потерь в АД, которые не зависят от нагрузки:

$$\Delta p_{const}(t) = p_{1xx}(t) - \Delta p_{m1xx}(t) = \Delta p_{mex}(t) + \Delta p_{доп}(t) + \Delta p_{cm}(t) \quad (7)$$

С учетом (7) мощность на валу асинхронного двигателя:

$$p_2(t) = p_1(t)(1-s(t)) - \Delta p_{m1n}(t) - \Delta p_{const}(t), \quad (8)$$

где $\Delta p_{m1n}(t) = i_{An}^2(t)R_A + i_{Bn}^2(t)R_B + i_{Cn}^2(t)R_C$ – электрические потери в меди статора в режиме работы под нагрузкой; $i_{An}(t), i_{Bn}(t), i_{Cn}(t)$ – токи соответствующих фаз статора под нагрузкой.

Момент на валу АД можно рассчитать по выражениям:

$$M(t) = p_2(t) / \omega(t), \quad (9)$$

где $\omega(t)$ – угловая частота вращения.

Проведенный расчет мощности на валу АД показал достаточную точность метода. Например, погрешность определения мощности на валу АД не превышает 5%, причем для двигателей с мощностью более 160 кВт она близка к 1% (табл. 2).

Таблица 2 – Погрешности расчета мощности P_2

Двигатель	$P_H = 30$ кВт, $s_H = 0,023$	$P_H = 160$ кВт, $s_H = 0,014$
Параметр		
Погрешность расчета мощности P_2 на валу, %	2,1	1,03

Коэффициент полезного действия за цикл работы ЭП технологического механизма по определенной мощности $p_2(t)$ на валу и измеренной потребляемой мощности $p_1(t)$ определяется выражением:

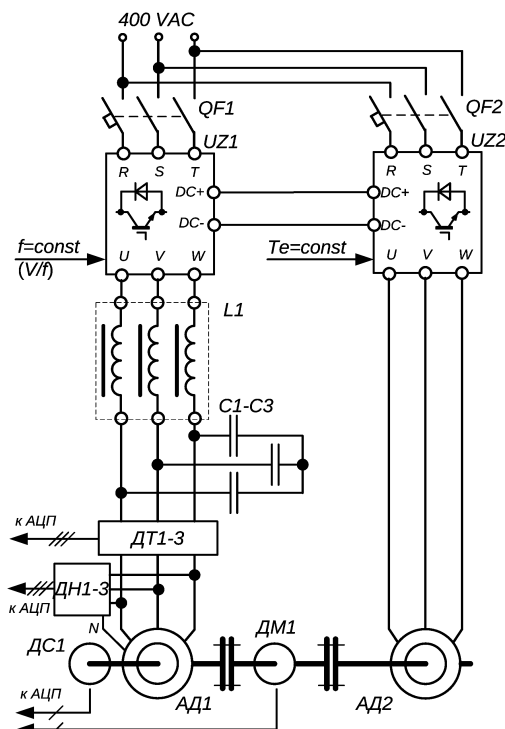
$$\eta = \int_0^{T_c} p_2(t) dt / \int_0^{T_c} p_1(t) dt, \quad (10)$$

где T_c – время цикла.

Рис. 1 Исследовательский лабораторный стенд для испытаний АД под нагрузкой.

Основные преимущества предлагаемого метода заключаются в том, что нет необходимости в определении всех параметров СЗ, кроме активных сопротивлений фаз статора, и проведении классического опыта холостого хода с изменением напряжения питания. Также нет необходимости в выведении АД из технологического процесса и применении оборудования для создания специальных тестовых воздействий.

Для экспериментальной оценки точности метода определения мощности на валу разработан исследовательский лабораторный стенд, позволяющий реализовать испытания АД под нагрузкой (рис. 1).



```

ni := n
n0,1 ← 0
edge ← 0
j ← 1
for i ∈ 0..N - 2
  if nsi = -1 ^ nsi+1 = 1
    if edge = 0
      t1 ← i dt
      edge ← 1
      n0,0 ← t1
    otherwise
      edge ← edge + 1
      if edge = Ma + 1
        t2 ← i dt
        nj,1 ←  $\frac{1}{\int_{t2-t1}^{k} dt}$ 
        nj,0 ← t2
        j ← j + 1
        edge ← 1
        t1 ← t2
  n

```

Рис. 2 Алгоритм пересчета импульсного сигнала частоты вращения в непрерывный.

ческой развязкой на основе усилителей ISO124P.

Сигналы с выходов датчиков скорости (*BR1*) и момента (*BT1*) являлись импульсными частотными сигналами с максимальными частотами соответственно 2,5 кГц и 15 кГц. Модуль АЦП настраивался на частоту 40 кГц на канал. Пересчет импульсного сигнала в непрерывный осуществлялся программно с использованием математического пакета Mathcad, в соответствии с алгоритмом (рис. 2), где *M* – количества периодов усреднения импульсного сигнала. Пересчет сигнала момента осуществлялся аналогично.

Согласно (1), рассчитывалась мощность $p_{2p}(t)$ на валу АД и сравнивалась с мощностью $p_{2s}(t)$ на валу, полученной на основании прямых измерений момента и скорости:

$$p_{2s}(t) = T(t) \omega(t), \quad (11)$$

где $T(t)$ – момент на валу АД, полученный экспериментально с использованием датчика момента, $\omega(t)$ – угловая частота вращения.

На рис. 3÷5 показаны результаты экспериментов при частотном пуске АД1 с временем пуска 0,2 с. Основываясь на измеренных сигналах тока и напряжения (рис. 4), рассчитывались мгновенные активная $p_1(t)$, реактивная $q_1(t)$ потребляемые мощности, а также мощность $p_{2p}(t)$ на валу АД (рис. 5).

В другом эксперименте (рис. 6÷9) нагрузка на валу АД от минимального значения до значения 1,1 мощности на валу изменялась за время $t \approx 0,75$ с. При этом электромагнитная постоянная времени исследуемого АД составляла $T_E = 3,5$ мс, а электромеханическая $T_M = 7$ мс. В связи с малыми значениями постоянных времени АД по сравнению с временем изменения нагрузки, динамические составляющие момента АД считались незначительными и оценка точности определения мощности на валу на этом участке экспериментальных кривых осуществлялась как для статического режима работы.

Результаты обработки опытов работы АД на холостом ходу и под нагрузкой приведены в табл. 3.

Оценка определения мощности на валу АД проводилась путем сравнения полученных величин на основании расчета $p_{2p}(t)$ и экспериментальных измерений $p_{2s}(t)$:

$$\Delta = \left| \frac{p_{2s}(t) - p_{2p}(t)}{p_{2s}(t)} \right| \cdot 100\% \quad (12)$$

Стенд включает в себя два одинаковых АД типа АИР80В4У2 ($P_n = 1,5$ кВт; $I_n = 6,3 / 3,6$ А; $\eta_n = 77\%$; $n_n = 1395$ об/мин; $\cos\phi_n = 0,81$; режим работы – S1; номинальные суммарные потери $\Delta P_{\Sigma n} = 448$ Вт). АД соединяются через датчик динамического момента ESMNJ01 (диапазон крутящего момента – 50 Нм, выходная частота – 5÷15 кГц, точность – ±0,5%). Для контроля частоты вращения используется инкрементный энкодер типа E40S8-100-3-T-24 (100 имп/об).

Для питания нагружаемого и нагруженного двигателей использовались соответственно ПЧ ToshibaVFS11 (*UZ1*) и INVTGD100 (*UZ2*). ПЧ *UZ1* работает в режиме скалярного частотного управления, а ПЧ *UZ2* работает в режиме векторного управления со стабилизацией электромагнитного момента. Двигатель *АД1* работает в двигательном режиме, а *АД2* – в генераторном с постоянным моментом на валу, создавая необходимое нагружение для двигателя *АД1*. Объединение ПЧ по шине постоянного тока позволяет передавать энергию, рекуперированную двигателем *АД2*, через инвертор ПЧ *UZ1* на двигатель *АД1*. Таким образом, основной поток энергии циркулирует по каналу *UZ1–АД1–ДМ1–АД2–UZ2–UZ1*. При этом из питающей сети потребляется только мощность потерь в преобразователях частоты и двигателях. Для фильтрации напряжения на выходе ПЧ *UZ1* используется LC-фильтр (*L1, C1–C3*). Использование LC-фильтра обеспечивает на частоте 50 Гц коэффициент несимметрии кривой напряжения $K_U \leq 4\%$ при частоте ШИМ, равной 8кГц. Токи и напряжения в цепи *АД1* контролировались датчиками тока *ДТ1–ДТ3* и датчиками напряжения *ДН1–ДН3* соответственно. Сигналы с датчиков тока (*ДТ1–ДТ3*), напряжения (*ДН1–ДН3*), момента (*ДМ1*) и скорости (*ДС1*) передавались на аналого-цифровой преобразователь (*АЦП*) для оцифровки и передачи данных в компьютер.

В качестве АЦП был использован USB модуль *LCard E14-440* (14 бита, 400 кГц, 32 канала). В качестве датчиков тока использовались датчики *LA25-NP* (вход – 25 А, выход – 25 мА). Датчики напряжения реализовывались на основе прецизионных делителей напряжения с гальвани-

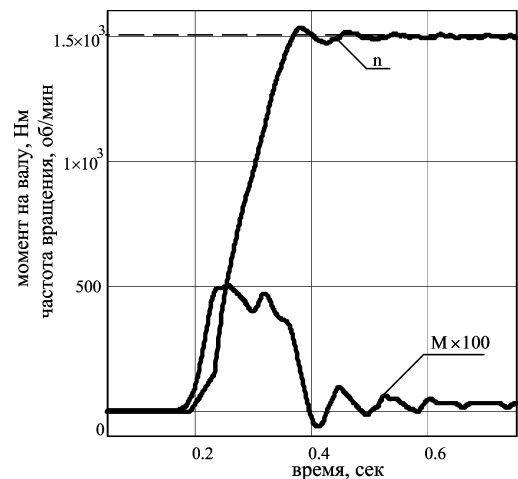


Рис. 3 Момент на валу и частота вращения АД при частотном пуске.

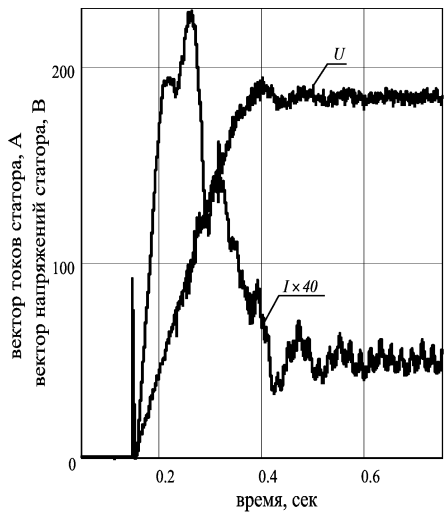


Рис. 4 Векторы тока статора и напряжения АД при частотном пуске.

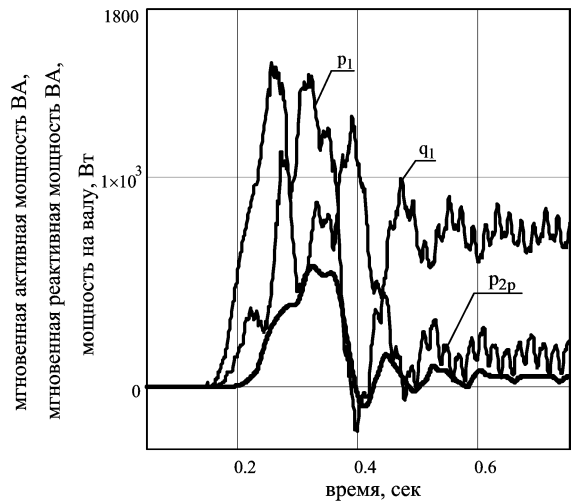


Рис. 5 Мгновенные активная и реактивная мощности, а также мощность на валу при частотном пуске.

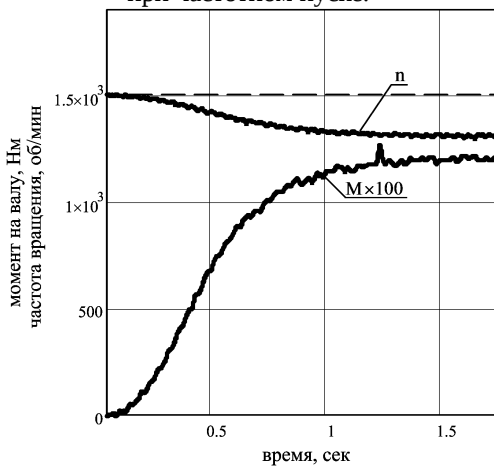


Рис. 6 Момент на валу и частота вращения АД при увеличении нагрузки.

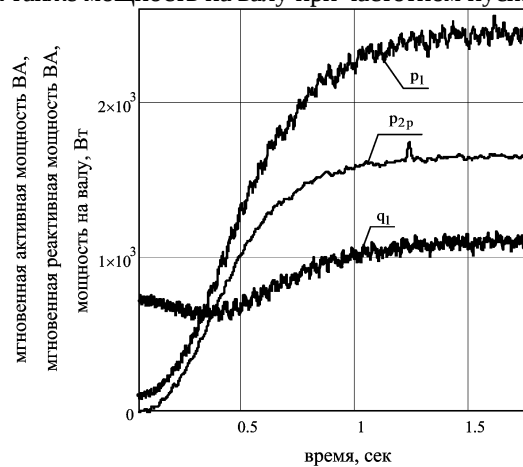


Рис. 7 Мгновенные активная и реактивная мощности, а также мощность на валу при увеличении нагрузки.

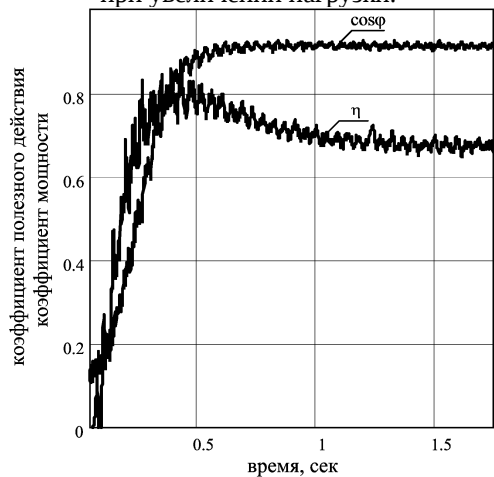


Рис. 8 КПД и коэффициент мощности АД при увеличении нагрузки.

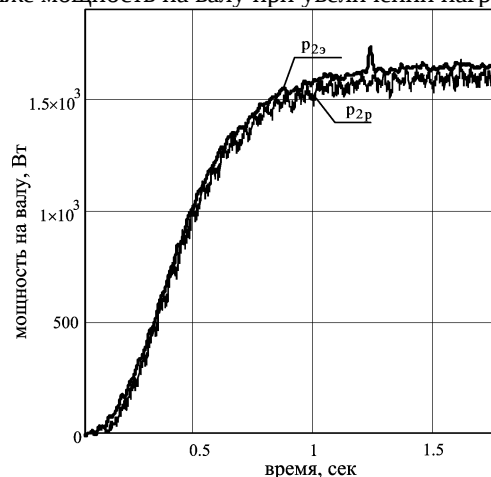


Рис. 9 Мощность на валу АД (расчетная $p_{2p}(t)$ и экспериментальная $p_{2s}(t)$).

Основным источником дополнительных погрешностей всех методов расчета мощности на валу и энергетических показателей являются температурные изменения сопротивления статора АД или их неточное определение. Для оценки влияния точности определения сопротивлений статора на точность расчета мощности на валу АД, производилась вариация сопротивлений R_s статора в пределах $\pm 10\%$ (табл. 4).

Анализ результатов показал высокую точность определения энергетических показателей, полученных с использованием косвенного метода расчета мощности на валу АД. Так, в диапазоне нагрузок от 0,5 до 1,1 номинальной мощности даже при определении сопротивлений статора АД с погрешностью $\pm 10\%$, погрешность раз-

работанного метода не превысила 7 %. Для диапазона нагрузок от 0,6 до 1,1 номинальной мощности при точном определении сопротивлений статора АД погрешность разработанного метода не превысила 5 %.

Выводы. Предложен метод косвенного определения мощности на валу асинхронного двигателя, который позволяет оценить его энергетическую эффективность в условиях минимально доступной информации о его параметрах. В работе представлен разработанный исследовательский лабораторный стенд, позволяющий реализовать испытания асинхронного двигателя под нагрузкой с возможностью прямого измерения момента и скорости. Анализ экспериментальных исследований метода косвенного определения мощности на валу асинхронного двигателя показал приемлемую точность даже в условиях определения сопротивлений статора с существенной погрешностью. Метод рекомендуется к применению в электроприводах с частотным регулированием для задач мониторинга, диагностики, отказоустойчивого управления, а также при испытаниях новых и отремонтированных двигателей.

Список литературы: 1. *Bucci G.* Uncertainty issues in direct and indirect efficiency determination for three-phase induction motors: remarks about the IEC 60034-2-1 standard / *G. Bucci, F. Ciancetta, E. Fiorucci, A. Ometto.* – IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. – Vol. 65, Issue 12. – P. 2701–2716. 2. *Zagirnyak M.* A comparison of informative value of motor current and power spectra for the tasks of induction motor diagnostics / *M. Zagirnyak, D. Mamchur, A. Kalinov.* – Proceedings of 2014 IEEE 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC). – Antalya, Turkey, 2014. – P. 540–545. 3. *Загірняк М. В.* Діагностика асинхронних двигунів на основі аналізу сигналу споживаної потужності / *М. В. Загірняк, Д. Г. Мамчур, А. П. Калінов, А. В. Чумачова.* – Кременчук.: ЧП Шчербатых О. В., 2013. – 208 с. 4. *Zagirnyak M.* Correction of operating condition of a variable-frequency electric drive with a non-linear and asymmetric induction motor / *M. Zagirnyak, A. Kalinov, A. Chumachova.* – IEEE Conference transactions. EUROCON 2013, 1-4 July 2013, Croatia. – P. 1033–1037. 5. *Мельников В.О.* Поліпшення енергетичних характеристик електроприводів з векторним керуванням шляхом компенсації параметричної несиметрії асинхронних двигунів / *В.О. Мельников, А. П. Калінов, Д. Мамчур.* – Технічна електродинаміка. – Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2012. – № 3. – С. 85-86. 6. *Tong W.* Mechanical design of electric motors / *W. Tong.* – NY.: CRC Press Taylor & Francis Group, – 2014. – 737 p. 7. ANSI/IEEE Standard 112-2004. Standard test procedure for polyphase induction motors and generators. 8. *Agamloh E.* Accurate determination of induction machine torque and current versus speed characteristics / *E. Agamloh, A. Cavagnino, S. Vaschetto.* – Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE 8-22 Sept. 2016. DOI: 10.1109/ECCE.2016.7854812. 9. *Guimarães J.M.C.* Determination of three-phase induction motors model parameters from catalog information / *J.M.C. Guimarães, J.V. Bernardes Jr., A.E. Hermeto, E.C. Bortoni.* – PES General Meeting / Conference & Exposition, 27-31 July 2014 National Harbor, MD, USA IEEE. 10. *Jaiswal S.* Condition assessment of induction motor under different power quality events / *S. Jaiswal, M. S. Ballal.* – International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems, IEEE CATCON. – 2015. – P. 105–110.

Bibliography (transliterated): 1. *Bucci, G., F. Ciancetta, E. Fiorucci, A. Ometto.* “Uncertainty issues in direct and indirect efficiency determination for three-phase induction motors: remarks about the IEC 60034-2-1 standard.” *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement* 65.12: (2016): 2701–2716. Print. 2. *Zagirnyak, M., D. Mamchur, A. Kalinov.* “A comparison of informative value of motor current and power spectra for the tasks of induction motor diagnostics.” *Proceedings of 2014 IEEE 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC)* (2014): 540–545. Print. 3. *Zagirnyak, M. V., D. G. Mamchur, A. P. Kalinov, A. V. Chumachova.* *Diagnostika asinhronnih dviguniv na osnovi analizu signalu spogivanoj potuznosti.* Kremenchuk.: ChP Shcherbatykh O. V., 2013. Print. 4. *Zagirnyak, M., A. Kalinov, A. Chumachova.* “Correction of operating condition of a variable-frequency electric drive with a non-linear and asymmetric induction motor.” *IEEE Conference transactions. EUROCON* (2013): 1033–1037. Print. 5. *Mel'nykov, V.O., A. P. Kalinov.* “Polipshennya enerhetychnykh kharakterystyk elektropyvodiv z vektornym keruvanniam shlyakhom kompensatsiyi parametrychnoyi nesymetriyi asinhronnykh dvyhuniv”. *Kyyiv: Instytut elektrodynamiky NAN Ukrayiny. Tekhnichna elektrodynamika* 3 (2012): 85-86. Print. 6. *Tong, W.* *Mechanical design of electric motors.* NY.: CRC Press Taylor & Francis Group, 2014. Print. 7. ANSI/IEEE Standard 112-2004. Standard test procedure for polyphase induction motors and generators. Print. 8. *Agamloh, E., A. Cavagnino, S. Vaschetto.* “Accurate determination of induction machine torque and current versus speed characteristics”. *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, (2016): DOI: 10.1109/ECCE.2016.7854812. Print. 9. *Guimarães, J.M.C., J.V. Bernardes Jr., A.E. Hermeto, E.C. Bortoni.* “Determination of three-phase induction motors model parameters from catalog information”. *PES General Meeting / Conference & Exposition, 27-31 July 2014 National Harbor.* (2014). Print. 10. *Jaiswal S., M. S. Ballal.* “Condition assessment of induction motor under different power quality events”. *International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems, IEEE CATCON.* (2015): 105–110. Print.

Поступила 16.06.2017

Таблица 3 – Результаты обработки экспериментальных данных метода определения энергетических показателей АД

Параметр	Режим работы		Параметр	Режим работы	
	холостой ход	нагрузка		холостой ход	нагрузка
Измеренные параметры			Рассчитанные параметры		
I_A, A	2,217	4,094	s	0,004	0,067
I_B, A	2,191	4,29	$P_1, Вт$	189,93	$2,445 \cdot 10^3$
I_C, A	2,168	4,15	$\Delta P_{м1}, Вт$	73,15	418,42
$R_A, Ом$	5,068	7,957	$\cos(\varphi)$	0,157	0,842
$n, об/мин$	1494	1400	$\Delta t, ^\circ C$	17,3	143,64
Рассчитанные параметры в режиме под нагрузкой					
$P_2, Вт$		$M, Нм$		$\eta, \%$	
$1,746 \cdot 10^3$		11,92		71,4	

Таблица 4 – Погрешность расчета мощности на валу АД

Мощность на валу АД1, о. е.	0,3	0,5	0,75	1,0	1,1	
Погрешность $\Delta, \%$	$0,9R_s$	9,36	5,83	2,80	1,52	1,04
	R_s	9,51	6,32	3,81	3,20	3,34
	$1,1R_s$	9,66	6,81	4,81	5,00	5,63