

РОЗДІЛ «ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА»

УДК 621.313.333.072

КАЛИНОВ А.П., к.т.н., доцент
МАМЧУР Д.Г., ассистент
ЧУМАЧЁВА А.В., магистрант

Кременчугский государственный политехнический университет
имени Михаила Остроградского

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Запропоновано метод аналізу енергетичних показників асинхронних машин (АМ) в умовах неякісності напруги живлення, конструктивної та параметричної несиметрії електричної машини і зміни режимів її роботи за миттєвими значеннями фазних струмів і напруг статора, що дозволяє оцінити ефективність роботи АМ за кривими активної, реактивної і повної потужності, електромагнітного моменту, коефіцієнта потужності, миттєвого коефіцієнта корисної дії.

Предложен метод анализа энергетических показателей асинхронных машин (АМ) в условиях некачественности напряжения питания, конструктивной и параметрической несимметрии электрической машины и изменения режимов её работы по мгновенным значениям фазных токов и напряжений статора, что позволяет оценить эффективность работы АМ по кривым активной, реактивной и полной мощности, электромагнитного момента, коэффициента мощности, мгновенного коэффициента полезного действия.

This paper presents a technique for the analysis of the energy indicators of an asynchronous motor operating in low-quality voltage supply, constructional and parametric asymmetry of an electrical machine, and operating modes changing. The technique is based on an instantaneous stator phase currents and voltages. This makes possible to estimate an asynchronous motor operating efficiency on the basis of active, reactive and total power curves, electromagnetic torque curve, power factor curve and instantaneous efficiency.

Введение. В связи с необходимостью внедрения энергоресурсосберегающих технологий в производственный процесс возникает задача оценки энергетических режимов работы электромеханических преобразователей, в частности, асинхронных электродвигателей (АД). В настоящее время регламентируется лишь влияние качества питающей электрической энергии на электромеханический преобразователь [2, 3], при этом считается, что он исправен, электрически и магнитно симметричен. В работах ряда исследователей [4, 9] показано, что существующие методы оценки энергоэффективности работы электрических машин морально устарели вследствие увеличения количества электроприводов переменного тока, работающих при несинусоидальных токах и напряжениях, а также имеющих определенную степень исходной или приобретенной конструктивной параметрической несимметрии. Необходимость разработки и внедрения новых методов оценки как энергоэффективности работы, так и технического состояния электромеханических преобразователей обусловлена следующими причинами:

– ввиду несинусоидальности токов и напряжений и неоднонаправленности потоков энергии оценка энергоэффективности работы электромеханического оборудования

на основе классических показателей КПД и коэффициента мощности является неадекватной;

- отсутствуют чёткие нормативные и экономические рычаги для стимулирования энергоресурсосбережения средствами электропривода (ЭП);

- проведение операций диагностики и мониторинга электромеханического оборудования как в стационарных, так и в полевых условиях базируется на упрощенных зависимостях и математических моделях без учета энергетического режима работы;

- существует необходимость определения остаточного ресурса электромеханического оборудования для повышения эффективности ведения энергохозяйства;

- существует необходимость регламентирования качества выполнения технологических операций электроприводом и оценки негативных влияний некачественности преобразования энергии на питающую сеть и обслуживающий персонал;

- современные эффективные системы оптимизации энергопотребления должны стать неотъемлемым атрибутом систем управления частотнорегулируемого ЭП.

Постановка задачи. Для решения поставленных задач [4] было введено понятие показателей качества преобразования энергии (ПКПЭ). В работах [5, 6] были сформированы отдельные ПКПЭ, которые условно можно разделить на коэффициенты, основанные на анализе потребляемой мощности, тока и электромагнитного момента АД.

Показатели по первым двум рассмотренным группам являются легко определяемыми ввиду простоты измерения мгновенных значений токов и напряжений. Третья группа показателей базируется на анализе составляющих электромагнитного момента, прямое измерение которого затруднительно. При этом определение мгновенных значений электромагнитного момента позволяет получить ряд важных энергетических показателей.

Цель работы – исследование энергетических характеристик асинхронных двигателей в динамическом режиме для задач оценки их энергетической эффективности работы.

Результаты работы. Для анализа энергетических показателей работы асинхронных машин предлагается метод, который базируется на основе экспериментальных сигналов фазных токов и напряжений статора АД. Применение этого метода обусловлено прежде всего тем, что в большинстве случаев в промышленных условиях единственными параметрами, которые можно достаточно просто измерить, зафиксировать и оценить, являются фазные токи и напряжения статора двигателя. Остальные параметры, характеризующие энергетическую эффективность и качество преобразования энергии, могут быть определены косвенно. В качестве дополнительных параметров, необходимых для реализации предложенного метода, выступают значения активных сопротивлений (R_A, R_B, R_C) и индуктивностей рассеяния (L_A, L_B, L_C) обмоток фаз статора, а также момент инерции (J) электромеханической системы. Указанные параметры могут быть получены с помощью ряда стандартных или альтернативных методов идентификации параметров АД [7].

Алгоритм определения электромагнитного момента, момента на валу и энергетических параметров приведен на рис.1. На рисунке приведены кривые этих параметров, рассчитанные по экспериментальным значениям напряжений и токов фаз АД (рис.2, 3) при прямом пуске на холостом ходу и набросе нагрузки, составляющей 20% от номинальной. Эксперименты проводились на АД типа MF-011-63 с параметрами $P_n=1.4$ кВт, $U_n=380$ В, $I_n=5.3$ А, $n_n=885$ об/мин.

При суммировании мгновенных мощностей всех фаз получаем мгновенную активную мощность трехфазной системы (рис.4). При определении мгновенного коэффициента мощности $\cos(\varphi(t))$ (рис.5) могут быть рассчитаны кривые мгновенной реактивной и полной (кажущейся) мощности (рис.4).

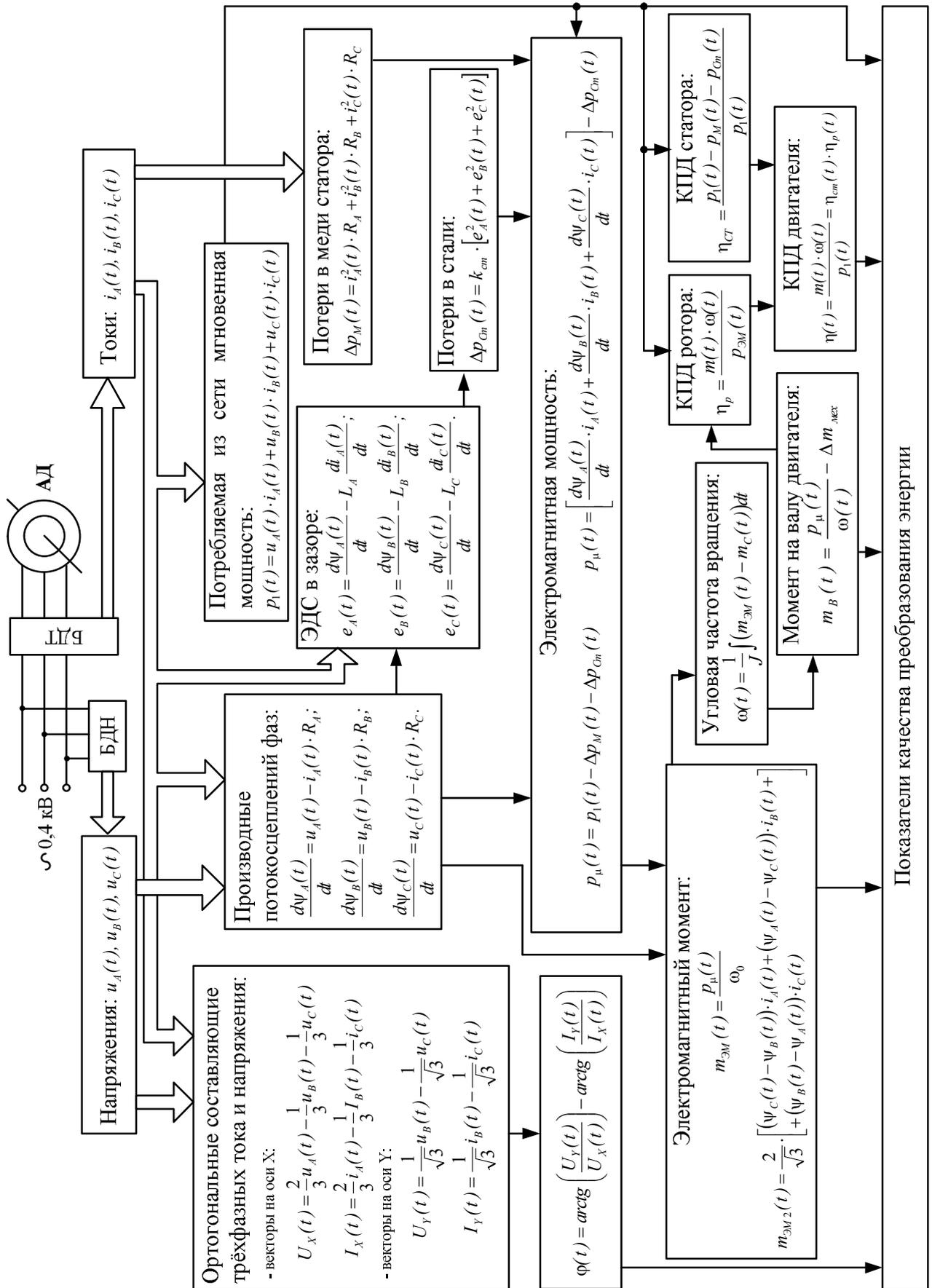


Рисунок 1 – Алгоритм определения ПКПЭ

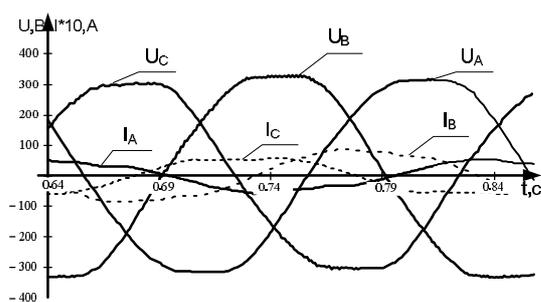


Рисунок 2 – Трёхфазная система напряжений и токов

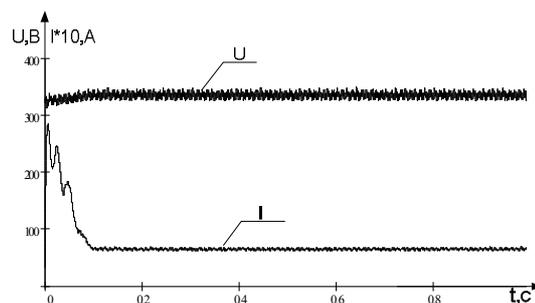


Рисунок 3 – Огибающие кривых напряжения и тока

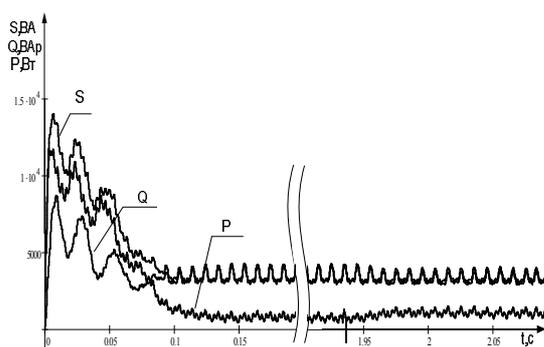


Рисунок 4 – Графики зависимостей при пуске и набросе нагрузки $S=f(t), Q=f(t), P=f(t)$

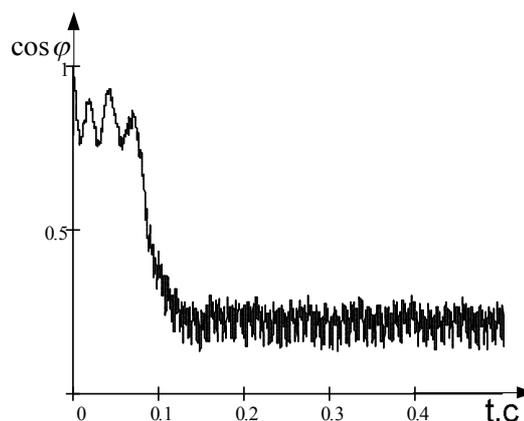


Рисунок 5 – Мгновенный коэффициент мощности трёхфазной системы

Мгновенный коэффициент мощности при этом рассчитывается путем предварительного перехода от трехфазной системы напряжений и токов к ортогональной системе (рис.5). При отсутствии несинусоидальности и несимметрии напряжений и токов $\cos(\varphi(t))$ представляет собой гладкую кривую, в статическом режиме – прямую. При наличии несинусоидальности и несимметрии питающей сети, конструктивной несимметрии и существенных нелинейностей АД в кривой мгновенного коэффициента мощности (рис.5) появляются колебания с двойной и выше частотой питающей сети, однако среднее значение за период напряжения питающей сети равно среднему значению коэффициента мощности по фазам АД.

Расчёт электромагнитного момента для АД в трёхфазной системе можно производить на основе потребляемой мощности и мощностей потерь, либо на основе токов и потокосцеплений статора (рис.6).

При известных активных сопротивлениях фаз статора относительно просто может быть получен так называемый наблюдаемый электромагнитный момент, отличие которого от реального обусловлено мгновенными значениями потерь в стали. Получаемая погрешность может варьироваться от 30-50% на холостом ходу и до 1-5% при номинальной нагрузке, что является допустимым для решения ряда задач. Потери в стали определяются величиной магнитного потока в зазоре АД или его аналога – э.д.с. в зазоре (рис.7), рассчитываемого по электрической схеме замещения. Расчёт э.д.с. в зазоре требует расчёта производных токов и наличия информации о значениях индуктивностей рассеяния фаз статора (рис.1). Коэффициент $k_{ст}$ считается постоянным и определяется на холостом ходу путем сопоставления с потерями в стали в статическом режиме, полученными по известным методам [8]. Для более точных расчётов мгновенных

потерь в стали коэффициент $k_{ст}$ должен учитывать форму э.д.с. каждой фазы в отдельности.

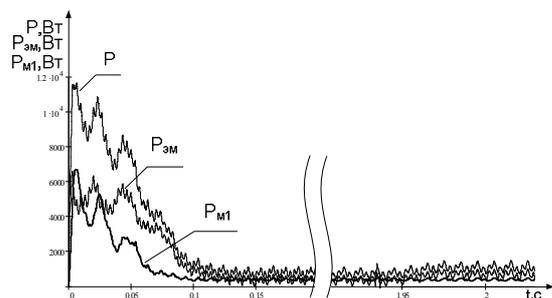


Рисунок 6 – Кривая активной потребляемой, электромагнитной мощности и мощности потерь в меди статора

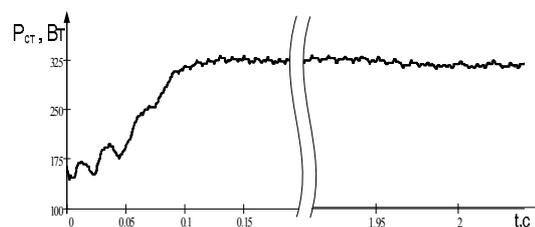


Рисунок 7 – Мгновенные потери в стали

Следует заметить, что мгновенные значения кривых электромагнитного момента полученного на основе мгновенных мощностей, и момента, полученного на основе производных потокосцеплений, отличаются, в то время как их средние значения за период совпадают (рис. 8). При этом необходимо учитывать недостаток метода определения электромагнитного момента через потокосцепления: так как процесс интегрирования переменных требует известных начальных условий, то имеет смысл использовать этот метод только при анализе всего переходного процесса, а не отдельного его участка. Получение кривой момента по потребляемой мощности и мощностям потерь возможно в любой момент времени.

Использование рассчитанного электромагнитного момента позволяет косвенно рассчитать угловую частоту вращения двигателя, при этом момент нагрузки рассчитывается как среднее значение электромагнитного момента за период в установившемся режиме. Определение мгновенных значений скорости позволяет рассчитать момент и мощность на валу АД. При косвенном расчете скорости вращения АД метод с использованием электромагнитного момента, рассчитанного по токам и потокосцеплениям, даёт лучшее совпадение с экспериментальной кривой по критерию среднеквадратичного отклонения (рис.9).

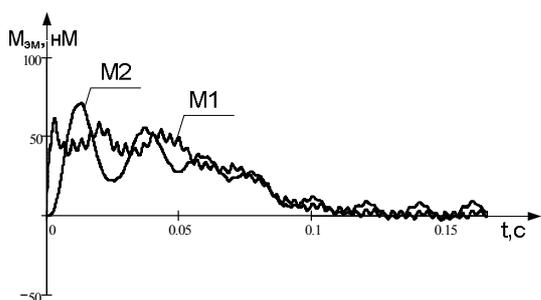


Рисунок 8 – Кривые электромагнитного момента, где M1 – момент, полученный на основе мгновенных мощностей, M2 – момент, полученный на основе производных потокосцеплений

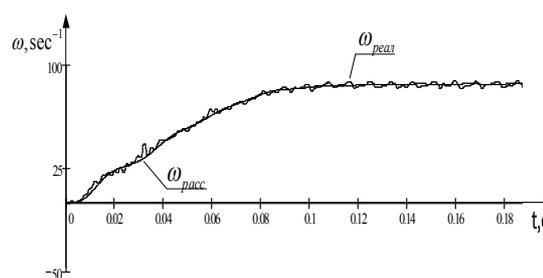


Рисунок 9 – Кривые скоростей, рассчитанных косвенно и полученных экспериментально

Косвенное определение скорости в статическом режиме также возможно на основе момента на валу двигателя и его механической характеристики. Механическую характеристику АД можно определить по методу, описанному в [9].

Как указывалось, КПД двигателя, рассчитываемый по стандартным методам в статических режимах, не позволяет учесть неоднаправленность потоков энергии в пуско-тормозных режимах. Поэтому предложен расчет мгновенных значений КПД электрической машины в целом и декомпозиция показателя КПД на КПД статора и КПД ротора в соответствии с конструктивной структурой АМ (рис.10). Для КПД статора в качестве потребляемой мощности берётся мощность, потребляемая из сети $p_1(t)$ (рис.11), а в качестве полезной – электромагнитная мощность $p_\mu(t)$, передаваемая через зазор от статора ротору. Для расчёта КПД ротора в качестве потребляемой мощности используется $p_\mu(t)$, а в качестве полезной – мощность на валу $p_2(t)$ (рис.11).

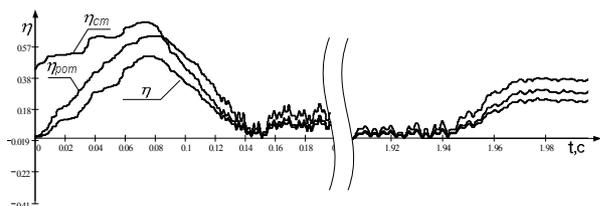


Рисунок 10 – Мгновенный КПД статора, ротора и электрической машины в целом

Декомпозиция КПД по статору и ротору позволит выявить источники ухудшения энергетических показателей.

Предложенный метод позволяет оценить энергетические характеристики АД в условиях некачественности напряжения питания, конструктивной и параметрической несимметрии электрической машины и изменения режимов его работы. Достоинство этого метода состоит в сокращении времени на анализ данных по сравнению с методом, предусматривающим разложение сигналов тока и напряжения на гармонические составляющие.

Выводы. Таким образом, с помощью предложенного метода решается задача наблюдаемости АД для анализа его технического состояния и энергетической эффективности его работы на основе показателей качества преобразования энергии. Указанная задача при этом входит в комплексную задачу создания систем определения остаточного ресурса работоспособности АД и создания на их основе энерго- и ресурсосберегающих режимов работы в составе регулируемого электропривода. Предложенный метод может быть положен также в основу создания систем компенсации конструктивной и параметрической несимметрии АД и оптимизации режимов энергопотребления на основе частотно-регулируемого электропривода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Важнов А. И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия, 1980. – 256с.
2. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. – Киев: Наукова думка, 1985.–268с.
3. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Вопросы качества электроэнергии в электроустановках. – Мариуполь: ПГТУ. – 1996. – 173с.
4. Родькин Д.И. Энергопроцессы в трёхфазной двигательной нагрузке с несинусоидальным напряжением питания// Проблемы создания новых машин и технологий. Сб. научных трудов КГПУ: Вып. 1. – Кременчуг. – 1998. – С.23-34.
5. Родькин Д.И., Чёрный А.П., Мартыненко В.А. Обоснование критериев качества преобразования энергии в электромеханических системах// Проблемы создания новых машин и технологий. Сб. научных трудов КГПУ: Вып. 1. – Кременчуг. – 2002. – С.81-85.

6. Чёрный А.П., Калинов А.П., Мамчур Д.Г. Применение показателей качества преобразования энергии для оценки состояния и надёжности электромеханических систем// Зб. наукових праць ДДТУ (техн. науки): Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2007. – С.519-523.
7. Родькин Д.И., Калинов А.П., Ромашихин Ю.В. Энергетический метод идентификации параметров асинхронных двигателей// Вісник КДПУ: Наукові праці КДПУ. – Вип. 3 (44). Ч.2 – Кременчук: КДПУ. – 2007. – С.130-136.
8. Вольдек А. И. «Электрические машины». Л.: Энергия, 1974. – 839с.
9. Ильинский Н.Ф., Горнов А.О. Критерий эффективности процесса электромеханического преобразования энергии// Электричество. – 1987. – №10. – С.24-29.
10. Калинов А.П., Мамчур Д.Г., Козинец В.Н., Воробейчик О.С. Определение механических характеристик асинхронного двигателя в пусковом режиме// Вісник КДПУ: Наукові праці КДПУ. – Вип. 4 (45). Ч.1 – Кременчук: КДПУ. – 2007. – С.108-111.

УДК 62-83:621.313.3.072.9

КАЛИНОВ А.П. к.т.н., доцент
МЕЛЬНИКОВ В.А., магистр
ВОРОБЕЙЧИК О.С., директор

Кременчугский государственный политехнический университет имени Михаила Остроградского
ООО «СЕМИОЛ», г. Кривой Рог

ИЗМЕРЕНИЕ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В СОСТАВЕ ЧАСТОТНО РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Запропоновано метод вимірювання напруг і струмів фаз статора асинхронного двигуна при живленні від перетворювача частоти із широтно-імпульсною модуляцією. Метод є простим і ефективним рішенням, що дозволяє підвищити точність вимірів шляхом застосування фільтрів високої частоти з наступною цифровою корекцією сигналу.

Предложен метод измерения напряжений и токов фаз статора асинхронного двигателя при питании от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией. Метод является простым и эффективным решением, позволяющим повысить точность измерений путем применения фильтров высокой частоты с последующей цифровой коррекцией сигнала.

In paper AM's stator phases voltage and currents measuring method at frequency converter with pulse-width modulation feed is offered. The method is the simple and effective decision, allowing to raise accuracy of measurements by application filters high frequency with the subsequent digital correction of a signal.

Введение. Одной из тенденций развития современного частотно регулируемого электропривода переменного тока является разработка и применение систем векторного управления, позволяющих оптимизировать динамические и энергетические режимы работы асинхронных двигателей (АД). Реализация таких систем управления базируется на наличии информации о параметрах АД, в частности, электромагнитных параметрах схемы замещения. Эти параметры, наряду с моментом инерции электромеханической системы, определяют динамические свойства двигателя и настройки системы управле-