

Калабаева А.¹, Вуйцик В.², Кашаганова Г.³, Тогжанова К.⁴ Касымова А.¹

¹Академия логистики и транспорта, Алматы, Казахстан

²Люблинский технический университет, Люблин, Польша

³ Университет Туран, Алматы, Қазақстан

⁴Алматинский технологический университет, Алматы, Қазақстан

E-mail: a.kalabaeva@list.ru

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

Аннотация. Разработаны и исследованы режимы работы системы автоматического управления электромеханическими преобразователями для синхронизации скоростей вращения ротора. Предлагаемая система автоматического регулирования оборотов позволяет настраивать ведомый двигатель на ведущий (синхронизировать обороты) в широком диапазоне от 0 до 5000 оборотов в минуту. Для повышения точности синхронизации предложен адаптивный алгоритм, позволяющий повысить точность синхронизации даже при отклонении номинальных параметров электромеханических преобразователей от нормированных значений.

Ключевые слова. Адаптивная синхронизация, номинальные параметры, угловая частота, частота вращения.

Введение. Электромеханические преобразователи (ЭМП), работающие в двигательном режиме (асинхронные двигатели, двигатели постоянного тока и т.д.) являются основным средством приведения в движение различных механизмов в современном промышленном производстве. В структуре потребления электроэнергии в развитых странах свыше 60% потребления приходится на электродвигатели. Управление рассматриваемыми объектами включает разнообразные задачи. Например, задачи пуска, торможения, защиты ЭМП. Для решения более сложных задач, связанных с поддержанием или целенаправленным изменением выходных координат объекта, применяются замкнутые системы управления. Использование таких систем позволяет обеспечить рациональные режимы работы технологических процессов.

На практике довольно часто возникает задача построения систем автоматического управления для обеспечения синхронного вращения нескольких силовых ЭМП, например, при прокате металлов или обдирке алмазов. Суть этой задачи состоит в обеспечении относительной синхронности по частоте вращения, а также обеспечении высокой точности и быстродействия синхронизации. Поэтому разработка системы автоматического управления с адаптивной синхронизацией частот вращения ЭМП в режиме разгона, реверса и торможения является актуальной научной задачей.

Материалы и методы

Модель системы автоматического управления частотами вращения ЭМП.

Известны работы [1-3], в которых рассматриваются системы управления ЭМП постоянного тока при условии одинаковой нагрузки на двигатели, которые не позволяют работать на частотах до 5000 об/мин и обеспечивать при этом высокую точность управления частотами вращения ротора ЭМП. Частотный регулятор, который предлагается использовать в системе управления, обеспечивает плавный запуск ЭМП без пусковых токов и механических ударов, что снижает нагрузку на электродвигатели и

связанные с ними механизмами [4]. Встроенный микропроцессорный ПИД-регулятор позволяет реализовать качественную систему автоматического управления ЭМП. При дискретной регулировке частот вращения ЭМП целесообразно исходить из непрерывной структуры ПИД-регулятора, модель которого подробно описана в [5, 6].

Учитывая уравнения преобразования [7 - 10], которыми описывается работа асинхронных двигателей (АД) и механической части ЭМП, модель ЭМП для управления частотой статора запишем в виде передаточных функций (рис. 1):

$$\frac{\Delta \bar{M}(p)}{\Delta \bar{\omega}_1(p) - \Delta \bar{\omega}(p)} = \left(\frac{\gamma}{v}\right)^2 \frac{(T_{el} p + 1) - \frac{(S/S_{кр})^2}{1 + (S/S_{кр})^2} (T_{el} p + 2)}{(T_{el} p + 1)^2 + (S/S_{кр})^2}; \quad (1)$$

$$\frac{\Delta \bar{\omega}(p)}{\Delta M(p) - \Delta M_o(p)} = \frac{1}{T_m p}, \quad (2)$$

где $\gamma = U_{1\alpha} / U_{1\omega n}$ - относительное напряжение статора;

$v = \Omega_1 / \Omega_{1n}$ - относительная частота статора;

$T_m = J \Omega_{0n} / M_{н.ф.н.}$ - механическая постоянная времени ЭМП;

$T_{el} = L_2'' / R_2'$ - электромагнитная постоянная времени АД;

$S_{кр} = \frac{R_2'}{L_2'' \Omega_1}$ - критическое скольжение; R_2' - активное сопротивление обмоток ротора;

$s = \frac{\omega_1 - p_n \omega}{\omega_1}$ - скольжение;

p_n - число пар полюсов АД;

ω_1 - угловая скорость статора;

$M_{н.ф.н.}$ - номинальное значение пускового момента;

$\Omega_{0n} = \Omega_{1n} / p_n$ - синхронная номинальная угловая скорость АД;

Ω_1 - номинальная угловая частота статора АД;

J - момент инерции АД;

ΔM_o - прирост момента сопротивления относительно начального значения;

$(\Delta M / M_{н.ф.н.}) = \Delta \bar{M}$ - прирост электромагнитного момента относительно начального значения;

$\Delta \omega_1$ - прирост угловой скорости относительно начального значения ω_1 .

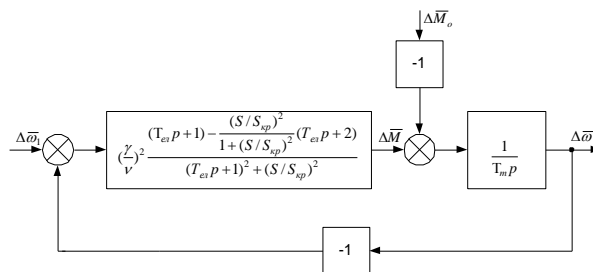


Рисунок 1 - Модель асинхронного ЭМП

Для моделирования работы системы автоматического управления с синхронизацией частот вращения ЭМП был использован АД типа 4А50 с такими параметрами: номинальное напряжение $U_n=220В$; номинальный ток $I_n=0,27 А$; синхронная скорость вращения $\Omega_0 = 3000$ об/хв; угловая частота напряжения статора $\omega=314$ рад/с; момент инерции ведущего ЭМП $J_1=0,0389$ кг·м²; момент инерции ведомого

ЭМП $J_2=0,038 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; момент сопротивления ведущего ЭМП $M_{o1}=15,38 \text{ Н}\cdot\text{м}$; момент сопротивления ведомого ЭМП $M_{o2}=14,39 \text{ Н}\cdot\text{м}$; количество пар полюсов $p=2$; активное сопротивление статора ведущего АД $R_1=152,9 \text{ Ом}$; активное сопротивление статора ведомого АД $R_2=192 \text{ Ом}$; индуктивность главного потока $L_m=2,66 \text{ Гн}$; индуктивность статора ведущего АД $L_1=3,175 \text{ Гн}$.

Система автоматического управления частотами вращения ЭМП работает следующим образом (рисунок 2 а): с помощью задатчика частоты (ЗЧ) сигналом U_1 через частотный регулятор ЧР₁ задается частота вращения АД; сигналы угловых скоростей ведущего АД₁ и ведомого АД₂ измеряются с помощью тахометрических датчиков (ТП₁ и ТП₂) выходные сигналы которых усиливаются и передаются на микроконтроллер (МК), который рассчитывает текущие частоты вращения ЭМП и автоматически отслеживает возникающую разницу (асинхронность) вращения. Если разница частот вращения ведущего АД₁ и ведомого АД₂ превышает заданную (20 об/мин), то МК автоматически формирует сигнал U_2 для частотного регулятора (ЧР₂), который уменьшает или увеличивает угловую скорость ведомого АД₂. При одновременной работе контуров регулировки ведомый ЭМП синхронно занимает положение

$$U_2 = U_1 \pm \Delta U . \quad (3)$$

Учитывая модель ПИД-регулятора, модель двух (ведущего и ведомого) асинхронных ЭМП (рисунок 1) и замкнув их в систему для автоматического управления частотами вращения ЭМП, получена модель системы управления, которая представлена на рисунке 2 б. Моделирование системы управления с разными нагрузками на их валах, проводилось в математическом пакете MATLAB - SIMULINK.

Результаты.

Результаты моделирования системы автоматического управления для синхронизации частот вращения ЭМП изображены на рисунке 3. Они свидетельствуют о том, что в разработанной системе управления происходит автоматическая синхронизация частот вращения ЭМП, т.е. ведомый ЭМП₂ подстраивается под ведущий ЭМП₁ (рисунок 3). Разница частот вращения, возникающая во время автоматической синхронизации, за счет изменения нагрузки на вале одного с АД, изображена на рисунке 3 б.

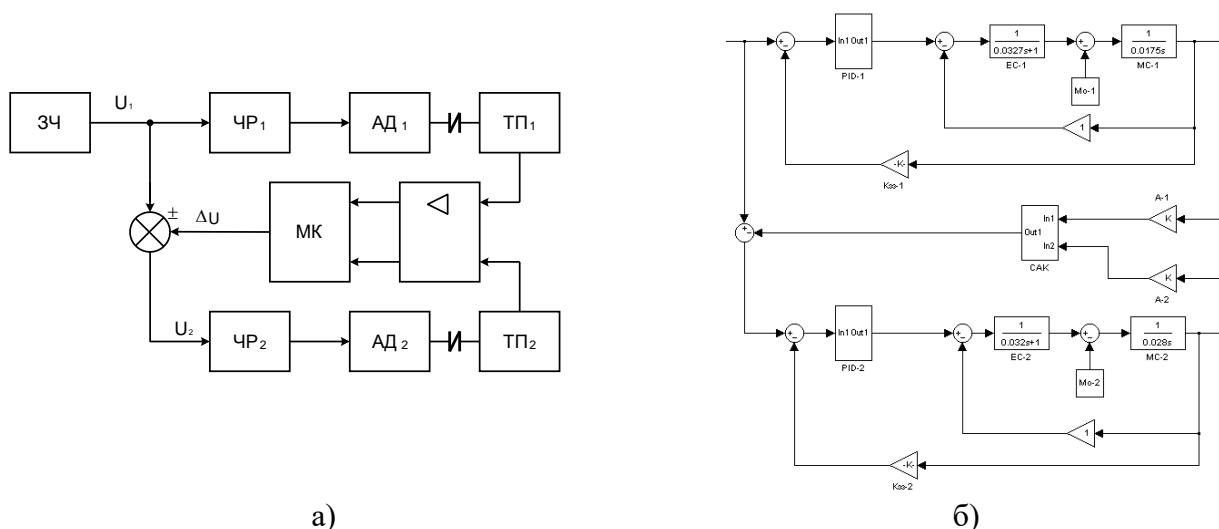


Рисунок 2 - Система управления для синхронизации частот вращения ЭМП:
 а) – структурная схема системы; б) – модель системы управления в пакете MATLAB

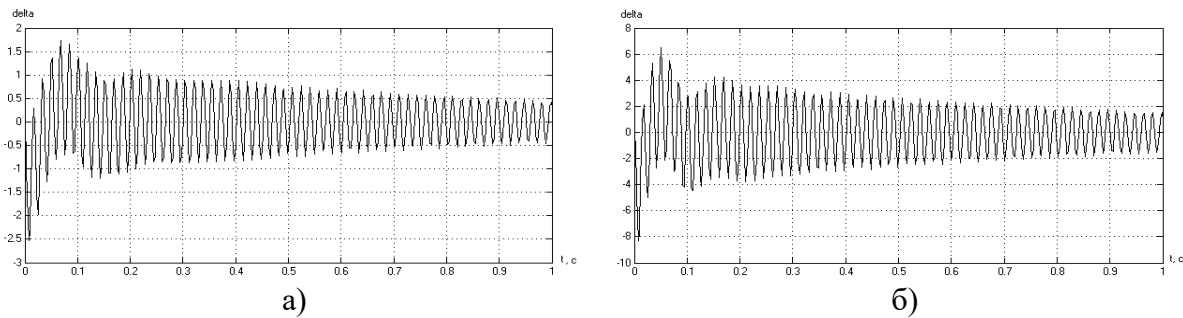


Рисунок 3 - Асинхронность вращения двух ЭМП при их автоматическом управлении: а) – при номинальных параметрах ЭМП; б) – при отклонении от номинальных параметров ЭМП

Как видно из рисунка 3 а, асинхронность (разность) вращения между двумя ЭМП в динамическом режиме составляет 4,3 об/мин, а в статическом режиме – 1 об/мин.

Также известно, что со временем параметры ЭМП: момент инерции, момент сопротивления, активное сопротивление статора, несущественно, но изменяются, а изменение этих параметров ведет к изменению электромагнитных (ЭМ) и механических (МС) постоянных времен. Если в модели ЭМП (рисунок 1) изменить эти параметры, то асинхронность вращения ЭМП увеличится (рисунок 3 б). Как видно из рисунка 3 б, в динамическом режиме асинхронность вращения составляет примерно 15 об/мин, а в статическом – в среднем 4 об/мин.

В результате исследований установлено следующие особенности: система управления частотами вращения ЭМП позволяет подстраивать ведомый ЭМП под ведущий ЭМП (синхронизировать частоты вращения) в широком диапазоне – от 0 до 5000 об/мин; асинхронность вращения ЭМП зависит от электромагнитных и механических параметров, свойств механизмов в процессе эксплуатации.

Адаптивная система автоматического управления частотами вращения роторов ЭМП.

Использование метода адаптивной синхронизации частот вращения роторов ЭМП решает следующие задачи:

1) При самопроизвольном изменении (отклонении) параметров ЭМП в системе управления возникают такие изменения параметров регуляторов, при которых динамические свойства системы для заданных воздействий не изменяются.

2) При начальном отсутствии информации о параметрах ЭМП и о влиянии на систему синхронизации выполняется автоматический поиск оптимальных условий работы системы в соответствии с заданным критерием качества.

В результате исследований было определено, что для решения задачи повышения точности синхронизации в условиях отклонения идентифицируемых параметров ЭМП целесообразно использовать алгоритм адаптивной синхронизации, построенный на сравнении высокочастотных и низкочастотных составляющих сигналов. Немаловажным преимуществом данного метода адаптации является то, что в нем не нужно вводить тестовые сигналы. Такие методы адаптивной синхронизации используются в тех случаях, когда необходимое качество автоматической синхронизации нестационарного объекта может быть обеспечено путем изменения передаточного коэффициента системы [7-9]. Блок-схема системы адаптивной синхронизации частот вращения ЭМП изображена на рисунке 4.

Как видно из рисунка 4, математические модели блоков, из которых состоит блок адаптивной синхронизации, представлены в виде известных передаточных функций, определенных в [7]. Неизвестными есть только передаточные функции блока адаптивной синхронизации частот вращения роторов ЭМП, в который входят: $W_M(s)$ – передаточная функция эталонной модели; $W_{фнч}(s)$ - передаточная функция фильтра низких частот; $W_{фвч}(s)$ - передаточная функция фильтра высоких частот; $\frac{k_i}{s}$ - регулятор контура самонастройки в виде интегратора с передаточным коэффициентом k_i .

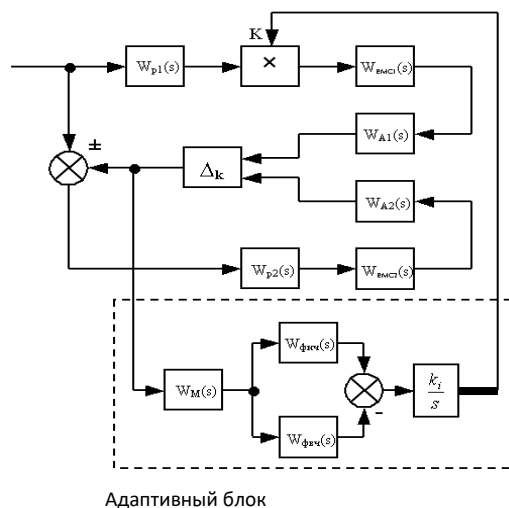


Рисунок 4 - Блок-схема адаптивной синхронизации частот вращения роторов ЭМП

Эталонные модели в той или иной степени используются в большинстве адаптивных систем. Такими моделями могут быть: модели замкнутой или разомкнутой системы; модели частей системы, в которой находятся нестационарные характеристики; наконец, могут быть заданы конкретные величины, которые являются эталоном для конкретных условий работы системы. В данном случае в качестве эталонной модели используем передаточную функцию ПИД-регулятора, которая имеет вид:

$$W_M(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + \frac{T_d \cdot s}{1 + T_\phi s}\right) \cdot \quad (4)$$

Далее сигнал погрешности разделяется по спектральным областям с помощью фильтров низких $W_{фнч}(s)$ и высоких $W_{фвч}(s)$ частот, имеющих следующие передаточные функции:

$$W_{фнч}(s) = \frac{1}{T_{фн} \cdot s + 1}, \quad W_{фвч}(s) = \frac{T_{фв} \cdot s}{T_{фв} \cdot s + 1}, \quad (5)$$

где $T_{фн}$ и $T_{фв}$ – соответственно константы времени фильтра нижних и верхних частот.

Константы времени фильтров можно рассчитать по формулам:

$$T_{фн} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_\phi},$$

где f_ϕ – максимальная частота вращения ЭМП ($f_\phi = 72$ Гц);

$$T_{\phi\epsilon} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_n},$$

где f_n – минимальная частота вращения ЭМП ($f_n = 5$ Гц).

При подстановке числовых значений частот константы времени фильтров будут следующими: $T_{\text{фнч}} = 0,0019$ с; $T_{\text{фвч}} = 0,032$ с.

На выходе интегратора формируется сигнал для изменения передаточного коэффициента ПИД-регулятора. Расчет передаточного коэффициента интегратора k_i производится из условия обеспечения устойчивости контура самонастройки [6, 7].

Моделирование адаптивного алгоритма синхронизации частот вращения ЭМП произведено с помощью математического пакета MATLAB с расширением SIMULINK. При моделировании адаптивного алгоритма синхронизации частот вращения роторов ЭМП, построенного на сравнении высокочастотных и низкочастотных составляющих сигналов (рисунок 4), получены следующие характеристики асинхронности вращения роторов ЭМП (рисунок 5).

Как видно из рисунка 5 а, асинхронность вращения роторов ЭМП при использовании адаптивного алгоритма синхронизации существенно уменьшилась по сравнению с асинхронностью, изображенной на рисунке 3. При таком же изменении электромагнитных и механических параметров (отклонении от номинальных параметров ЭМП) характеристика процесса синхронизации частот вращения ЭМП с помощью адаптивного метода примет вид (рисунок 5 б).

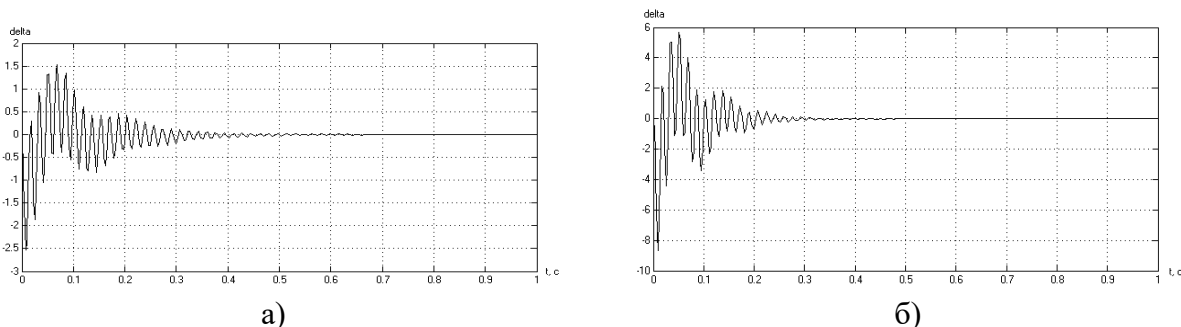


Рисунок 5 - Асинхронность вращения роторов с адаптивной синхронизацией при: а) – номинальных параметрах ЭМП; б) – отклонении от номинальных параметров ЭМП

Как видно с рисунка 5 б, при изменении параметров ЭМП асинхронность вращения роторов ЭМП в статическом режиме стала минимальной, а в динамическом – осталась такой же, как на рисунке 3 б. Это свидетельствует о том, что промоделированная адаптивная система синхронизации частот вращения ЭМП при изменении параметров автоматически изменяет (перенастраивает) коэффициенты ПИД-регулятора, то есть адаптируется.

Использование алгоритма адаптивной синхронизации частот вращения роторов ЭМП позволяет минимизировать погрешность процесса синхронизации в условиях отклонения параметров ЭМП от номинальных значений.

Обсуждение.

Разработано адаптивная система автоматического управления асинхронностью вращения ЭМП, которая позволяет синхронизировать частоты вращения роторов ЭМП как в статическом, так и в динамическом режимах работы в условиях отклонения параметров ЭМП.

Выводы.

Установлено, что асинхронность вращения роторов электромеханических преобразователей зависит от их электромагнитных и механических значений, свойств механизмов в процессе эксплуатации. Изменение (отклонение) этих значений от номинальных в процессе эксплуатации ЭМП тянет за собой увеличение асинхронность вращения роторов. Предложенный алгоритм адаптивной синхронизации частот вращения ЭМП позволяет минимизировать асинхронность (разность) вращения роторов, и тем самым повысить точность синхронизации частот вращения роторов ЭМП. Синхронное вращение роторов ЭМП позволяет значительно повысить качество производимой продукции при обеспечении технологических процессов проката металлов или обдирке алмазов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Льюнг Л. Идентификация систем (теории для пользователя). – М.: Высшая школа, 1991, с. 432.
- [2] Адамбаев М.Д. Определение динамической структуры и параметров промышленных объектов управления: Научное издание (монография). – Алматы, 2010. – 258 с.
- [3] Адамбаев М.Д. Повышение эффективности процесса сухого измельчения. Идентификация и автоматизация. LAP LAMBERT Academic Publishing. Saarbrücken, Deutschland/ Германия, 2014.
- [4] Васильев Д.В., Чуич В.Г. Системы автоматического управления (примеры расчета). – М.: Высшая школа, 1967, с. 419.
- [5] Адамбаев М.Д. Теория и практика технического эксперимента (учебник рекомендованный МОН РК). – Алматы: КазНТУ им К.И. Сатпаева, 2013.
- [6] Адамбаев М.Д. Автоматтандырылған реттеу мен реттегіштер. Оқу құралы. – Астана: Фолиант, 2018 – 216 б.
- [7] Адамбаев М.Д., Джулаева Ж.Т., Калабаева А.Е. СЫЗЫҚТЫ АВТОМАТТЫ РЕТТЕУ ЖҮЙЕЛЕРІ (МАТЕМАТИКАЛЫҚ НЕГІЗДЕРІ) Оқу құралы. – Алматы: М. Тынышбаев атындағы ҚазККА, 2019 – 180 б.
- [8] Адамбаев М.Д. и др. Под ред. Я.А. Полонского. Оценивание и мониторинг функционирования технических систем: коллективная научная монография//Новосибирск: изд. Сибирская ассоциация консультантов, 2012. – 168 с.
- [9] Dynamics of dry grinding in two-compartment separator// New Developments in Mining Engineering: «Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining», 2015, Taylor & Francis Group, London, p. 435-439, M. Adambayev, A. Kuttybaev, A. Auezova.
- [10] Research and development of software and hardware modules for testing technologies of rock mass blasting preparation//«Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining», 2015, Taylor & Francis Group, London, p. 185-192, M. Adambayev, A. Kopesbayeva, A. Auezova.

Айдана Калабаева, докторант, Логистика және көлік академиясы, Алматы, Қазақстан, a.kalabaeva@list.ru

Вальдемар Вуйцик, т.ғ.д., профессор, Люблин техникалық университеті, Люблин, Польша, waldemar.wojcik@pollub.pl

Гулжан Кашаганова, PhD, Туран университеті, Алматы, Қазақстан, guljan_k70@mail.ru

Күлжан Тогжанова, PhD, доцент, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан, togzhanova_kuljan@mail.ru

Айнур Касымова, аға оқытушы, Логистика және көлік академиясы, Алматы, Қазақстан, kasymova_79@mail.ru

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКАЛЫҚ ТҮРЛЕНДІРГІШТЕРДІ АВТОМАТТЫ БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІ

Аңдатпа. Ротордың айналу жылдамдығын синхрондау үшін электромеханикалық түрлендіргіштерді автоматты басқару жүйесінің жұмыс режимдері әзірленді және зерттелді. Ұсынылған айналымды автоматты басқару жүйесі басқарылатын қозғалтқышты минутына 0-ден 5000 айналымға дейінгі кең диапазонда реттеуге мүмкіндік береді (айналымдарды синхрондау). Синхрондау дәлдігін жақсарту үшін электромеханикалық түрлендіргіштердің номиналды параметрлері нормаланған мәндерден ауытқыған кезде де синхрондау дәлдігін арттыруға мүмкіндік беретін адаптивті алгоритм ұсынылады.

Түйінді сөздер. Адаптивті синхрондау, номиналды параметрлер, бұрыштық жиілік, айналу жиілігі.

Aidana Kalabaeva, doctoral student, Academy of logistics and transport, Almaty, Kazakhstan, a.kalabaeva@list.ru

Waldemar Wojcik, doctor of technical sciences, professor, Lublin technical university, Lublin, Poland, waldemar.wojcik@pollub.pl

Gulzhan Kashaganova, PhD, Turan university, Almaty, Kazakhstan, guljan_k70@mail.ru

Kulzhan Togzhanova, phd, docent, almaty technological university, Almaty, Kazakhstan, togzhanova_kuljan@mail.r

Ainur Kasymova, senior lecturer, Academy of logistics and transport, Almaty, Kazakhstan, kasymova_79@mail.ru

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR ELECTROMECHANICAL CONVERTERS

Annotation. The operating modes of the automatic control system for electromechanical converters for synchronization of rotor speeds have been developed and investigated. The proposed automatic speed control system allows you to adjust the driven engine to the master (synchronize the speed) in a wide range from 0 to 5000 rpm. To improve the synchronization accuracy An adaptive algorithm is proposed that allows to increase the synchronization accuracy even when the nominal parameters of the electromechanical transducers deviate from the normalized values.

Keywords. Adaptive synchronization, nominal parameters, angular frequency, rotational speed.
