

9. Janos Abonyi, Balázs Feil, Cluster Analysis for Data Mining and System Identification, Springer Science & Business Media, 2007, 324 p.

10. Pokorný P., Dostál P. Cluster analysis and neural network. In Technical Computing, Prague, 2008. Sborník příspěvků 16. ročníku konference. Praha: Humusoft. 2008. pp.

25-34.

11. Braslavskii I.Ya., Kostylev A.V., Stepanyuk D.P., Mezeusheva D.V. Synthesis of asynchronous-drive control systems using neural networks. Russian Electrical Engineering. No.76(9), 2005, pp. 65-68.

УДК 62-83

Шрейнер Р.Т., Поляков В.Н., Медведев А.В.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ РЕСУРС ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В ПЕРЕМЕЖАЮЩИХСЯ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

В работе рассмотрен частотно-регулируемый электропривод на основе явнополюсного синхронного двигателя. Описан объект исследования. Приведены функциональная схема и обобщенная структурная схема математической модели системы векторного управления синхронного электропривода. Сформулирована постановка задачи исследования электропривода в перемежающихся режимах работы. Описана методика моделирования синхронного электропривода, выявляющая предельно допустимые по нагреву нагрузки двигателя. Приведены результаты компьютерного моделирования перемежающихся режимов работы двигателя при постоянном и оптимальном регулировании магнитного потока якоря. Выявлен ресурс явнополюсного синхронного двигателя по критерию допустимого по нагреву момента двигателя. Проведен сравнительный анализ потерь мощности синхронного двигателя при работе частотно-регулируемого синхронного электродвигателя в перемежающихся режимах при постоянном и оптимальном регулировании магнитного потока якоря. Дано заключение об эффективности использования оптимального регулирования магнитного потока якоря в системах векторного управления синхронных электроприводов, работающих в перемежающихся режимах.

Ключевые слова: синхронный электропривод, явнополюсный двигатель, перемежающиеся режимы, ресурс по перегрузке, энергосбережение.

ВВЕДЕНИЕ

Допустимые области функционирования регулируемых электроприводов определяются параметрами силовой части (электродвигателей и силовых преобразователей) и формируются с учетом естественных и искусственных ограничений, отражающих объективно ограниченную либо допустимую по каким-либо критериям нагрузочную способность элементов силовой схемы. В отличие от двигателей постоянного тока, перегрузочная способность двигателей переменного тока не лимитируется условиями коммутации и теоретически может значительно превышать перегрузочную способность двигателей постоянного тока. Наиболее существенное влияние на допустимые области функционирования электропривода оказывают ограничения по нагреву двигателя и преобразователя, а также по объективно ограниченному максимальному выходному напряжению и максимально допустимому выходному току преобразователю частоты, питающего двигатель. Практически допустимые области функционирования частотно-регулируемых электроприводов переменного тока определяются не только отмеченными факторами, но и законом частотного управления и качеством его реализации в системе регулирования. Так, например, в [1] показано, что при использовании закона оптимального регулирования магнитного потока асинхронного двигателя в перемежающихся режимах работы позволяет повысить его допустимую по нагреву нагрузочную способность либо снизить величину потерь в двигателе при одинаковых нагрузках на 20–25% в зависимости от

времени приложения нагрузки. В данной статье ставится задача определения *ресурса по перегрузке* частотно-регулируемого синхронного электропривода при перемежающихся режимах работы, оптимизированного по минимуму потерь двигателя.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является частотно-регулируемый синхронный электропривод, функциональная схема которого приведена на **рис. 1**. Обмотка якоря явнополюсного синхронного двигателя (СД) получает питание от преобразователя частоты (ПЧ). Обмотка возбуждения подключена к управляемому преобразователю постоянного тока (ППТ). В состав системы управления входят трехмерная САР токов, разомкнутая САР электромагнитного момента и замкнутая САР скорости двигателя. Состояние синхронного электропривода контролируется датчиками фазных токов якоря (ДТЯ), тока возбуждения (ДТВ), скорости (ДС) и положения вала двигателя (ДП). Регулирование токов и электромагнитного момента ведется в прямоугольной системе координат, вращающейся синхронно с индуктором СД. Преобразование переменных осуществляется с помощью преобразователей координат (ПК1 и ПК2).

Благодаря тому, что регулирование токов и электромагнитного момента осуществляется в синхронно вращающейся с индуктором прямоугольной системе координат, описанная система управления позволяет обеспечивать близкие к нормированным электромеханические характеристики синхронного

электропривода при различных законах управления магнитным потоком двигателя.

На рис. 2 представлена схема математической модели системы управления синхронного электропривода, где введены следующие обозначения: \mathcal{M} , \mathcal{R}_ω , \mathcal{F} , \mathcal{P} , \mathcal{R}_m , \mathcal{L} , \mathcal{G} – операторы моделей силовой части, трехмерного регулятора токов (РТ), формирователя режимов (ФР), фильтра (Ф), регулятора скорости (РС), блока ограничения (БО) и датчика интенсивности (ЗИ).

Модель силовой части учитывает насыщение машины по главному магнитному пути и реактивную составляющую электромагнитного момента, обусловленную явнополюсностью индуктора. Магнитное состояние машины рассчитывается методом локальных характеристик намагничивания [2].

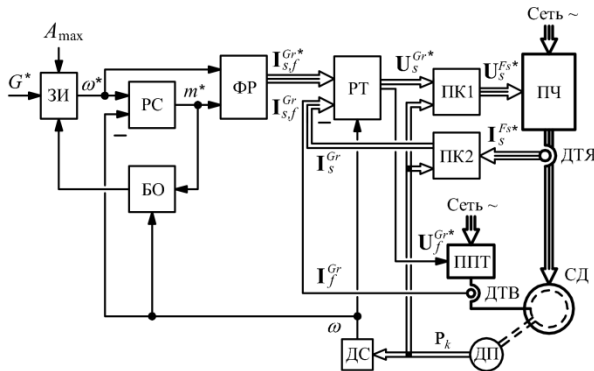


Рис. 1. Функциональная схема синхронного электропривода:

ПЧ – преобразователь частоты; СД – синхронный двигатель; ДТЯ и ДТВ – датчики токов обмоток якоря и возбуждения; ДС и ДП – датчики скорости и положение вала двигателя; ПК1 и ПК2 – преобразователи координат; РТ и РС – регуляторы токов и скорости; ФР – формирователь режимов; БО – блок ограничения; ЗИ – датчик интенсивности

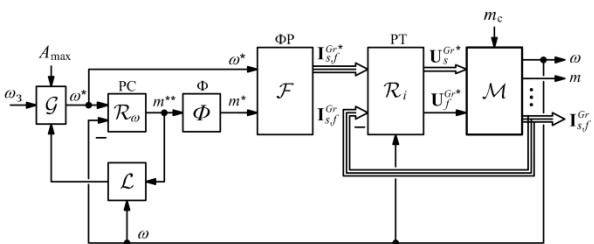


Рис. 2. Схема модели синхронного электропривода при векторном управлении

Трехмерный регулятор токов синтезирован по методике нелинейных многосвязных систем подчиненного регулирования [3]. В структурном отношении РТ имеет многомерный фильтр на выходе, элемент с обратным оператором звена токов модели силовой части электропривода и трехмерное интегрирующее звено. Благодаря такому составу РТ позволяет подавлять высокочастотных помехи в случае наличия их в каналах задания и обратных связей, осуществлять компенсацию влияния многомерного нелинейного звена токов, обеспечивать астатизм САР токов по управляющим воздействиям и оптимизацию динамических характеристик (вре-

мени переходного процесса, перерегулирования и др.).

Роль ФР состоит в формировании заданий для САР токов в функции заданных значений электромагнитного момента и скорости двигателя. С помощью ФР реализуются законы частотного управления и единичный коэффициент передачи разомкнутой САР электромагнитного момента.

Фильтр Ф на входе формирователя режимов позволяет согласовать быстродействие САР скорости с требованиями технологической задачи.

Регулятор скорости выполняет функцию корректирующего устройства и в зависимости от требований технологического процесса может быть пропорциональным либо пропорционально-интегральным. Синтез РС проводится по типовой методике систем подчиненного регулирования с настройкой статических и динамических характеристик САР на технический (модульный) оптимум.

Блок БО ограничивает выходной сигнал регулятора скорости. Благодаря этому осуществляется ограничение электромагнитного момента двигателя при перегрузках.

Задатчик интенсивности обеспечивает линейное нарастание скорости при ступенчатом сигнале на его входе.

Переменные и параметры математической модели (кроме текущего времени и постоянных времени) записаны в относительных единицах [2].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исследуется режим продолжительной работы при переменной нагрузке (S_6), то есть последовательность идентичных рабочих циклов, каждый из которых состоит из интервалов работы при постоянной нагрузке $m_n = M_n / M_{ном}$ и на холостом ходу $m_{х.х} = M_{х.х} / M_{ном}$. Характеризующей величиной является продолжительность нагрузки ПН = $t_n / (t_n + t_{хх})$, где t_n – интервал постоянной нагрузки; $t_{хх}$ – интервал холостого хода. Нормируемые стандартные значения ПН=15, 25, 40 и 60 %.

Задачей исследования является выявление электромеханического ресурса частотно-регулируемого синхронного электропривода при перемежающихся режимах работы, оптимизированного по минимуму потерь СД при переменном потоке. Под электромеханическим ресурсом электропривода подразумевается совокупность предельных значений показателей качества, определяющих допустимую область функционирования электропривода по перегрузке. В качестве обобщающего показателя качества принимается допустимый по нагреву момент двигателя ($m_{доп}$) на интервалах работы.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Объектом моделирования является явнополюсный синхронный двигатель с продольным электромагнитным возбуждением. Методика выявления допустимого момента по нагреву описана в [1] на примере асинхронного двигателя. С учетом особенностей синхронного двигателя как объекта управления эта методика включает следующие этапы. Сна-

чала проводится серия расчетов перемежающихся режимов при работе двигателя в системе частотного управления, в которой реализуется закон *постоянства потокосцепления обмотки якоря при ортогональности изображающих векторов потокосцеплений и токов якоря* [4] (далее закон при постоянстве магнитного потока якоря) независимо от момента нагрузки и скорости двигателя. Для поиска задающих воздействий САР токов, обеспечивающих режим работы СД при постоянстве магнитного потока якоря, конструируется целевая функция вида

$$J = a_1[(\Psi_{sd} i_{sd} + \Psi_{sq} i_{sq})]^2 + a_2(\Psi_s^* - \Psi_s)^2,$$

где a_1, a_2 – весовые коэффициенты; Ψ_{sd}, Ψ_{sq} и i_{sd}, i_{sq} – составляющие изображающих векторов полных потокосцеплений и токов обмотки якоря; ω – скорость двигателя; Ψ_s^* и Ψ_s – заданное и текущее значения модуля изображающего вектора полных потокосцеплений обмотки якоря.

При значении $J = 0$ обеспечивается режим работы СД при постоянстве потокосцепления $\Psi_s = \Psi_s^*$ и ортогональности изображающих векторов токов и потокосцеплений обмотки якоря.

Поиск управлений в этом случае сводится к решению экстремальной задачи

$$J(i_m^o, \nu_{i_m}^o, m, \omega) \rightarrow \min_{(i_m, \nu_{i_m})}, \quad (1)$$

где i_m и ν_{i_m} – модуль и аргумент изображающего вектора результирующих намагничивающих токов; i_m^o и $\nu_{i_m}^o$ – значения модуля и аргумента изображающего вектора результирующих намагничивающих токов, при которых $J = 0$.

Решение задачи (1) определяется в виде зависимостей $i_{sd}^o(m, \omega)$, $i_{sq}^o(m, \omega)$ и $i_{fd}^o(m, \omega)$. На

рис. 3 (штриховые линии) представлены i_{sd}^o , i_{sq}^o и i_{fd}^o , рассчитанные для двигателя мощностью 10 МВт при фиксированном значении скорости $\omega = 1$ и изменении момента m .

Термическое состояние СД оценивается по методу средних потерь, вычисляемых по формуле

$$\Delta p_{cp} = \frac{1}{t_{ц}} \int_0^{t_{ц}} [(k_s + k_{доб})i_s^2 + k_{fd}i_{fd}^2 + k_{магн.с} \omega_s^2 \Psi_m^2 + k_{мех} \omega^m] dt, \quad (2)$$

где $t_{ц}$ – продолжительность цикла; i_s и Ψ_m – модули изображающих векторов токов якоря и главных потокосцеплений; i_{fd} – ток обмотки возбуждения; k_i, n, m – постоянные коэффициенты.

Для каждого из нормируемых стандартом фиксированных значений ПН (0,15; 0,25; 0,4 и 0,6) рассчитываются зависимости средних потерь в двигателе за цикл Δp_{cp} от величины момента m_n на интервале нагрузки. В результате анализа этих зависимостей для каждого стандартного значения ПН и фиксированного времени цикла определяется такое значение m_n , при котором средние за цикл потери в двигателе Δp_{cp} оказываются равными номинальным потерям $\Delta p_{ном}$. В соответствии с методом средних потерь это значение m_n квалифицируется, как *допустимое по нагреву двигателя* при данном значении ПН и времени цикла. В результате находятся зависимости допустимых по нагреву величин момента нагрузки $m_{доп}$ от величины ПН и времени цикла $t_{ц}$.

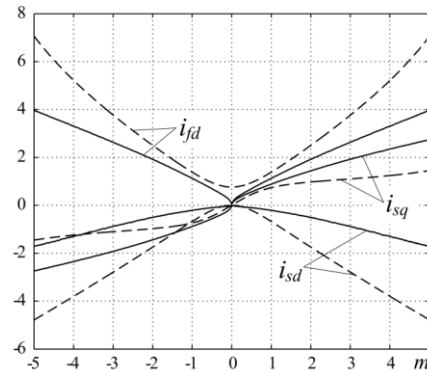


Рис. 3. Характеристики СД при постоянстве (штриховые линии) и оптимальном магнитном потоке якоря (сплошные линии)

Для выявления электромеханического ресурса СД при перемежающихся режимах проводится серия расчетов для двигателя в системе частотного управления, в которой реализуется закон управления по минимуму суммарных потерь СД при *переменном магнитном потоке* (далее закон при *переменном магнитном потоке якоря*). При оптимизации режимов СД по минимуму суммарных потерь используется целевая функция (2). Постановка задачи оптимизации формулируется следующем образом:

$$\Delta p(i_m^o, \nu_{i_m}^o, m, \omega) \rightarrow \min_{(i_m, \nu_{i_m})}, \quad (3)$$

Решение задачи (3) $i_{sd}^o(m, \omega)$, $i_{sq}^o(m, \omega)$ и $i_{fd}^o(m, \omega)$ (законы управления) представлены на **рис. 3** (сплошные линии) при фиксированном значении скорости $\omega = 1$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На **рис. 4, а** представлены зависимости допустимых по нагреву значений момента нагрузки двигателя $m_{доп}$ от величины продолжительности нагрузки. Время цикла перемежающегося режима принято равным 10 с.

На **рис. 4, а** сплошной линией показана зави-

симость при переменном магнитном потоке и штриховой линией – при постоянном магнитном потоке обмотки якоря.

Как видно, при уменьшении ПН допустимый по нагреву момент на интервале нагрузки $m_{\text{доп}}$ возрастает в сравнении с моментом, допустимым по нагреву в продолжительном режиме работы S1 (при ПН=1). Причем момент, допустимый по нагреву двигателя при переменном магнитном потоке якоря, превышает момент, допустимый по нагреву при постоянном магнитном потоке. В частности, величина превышения допустимого момента при ПН=0,25 составляет 37%.

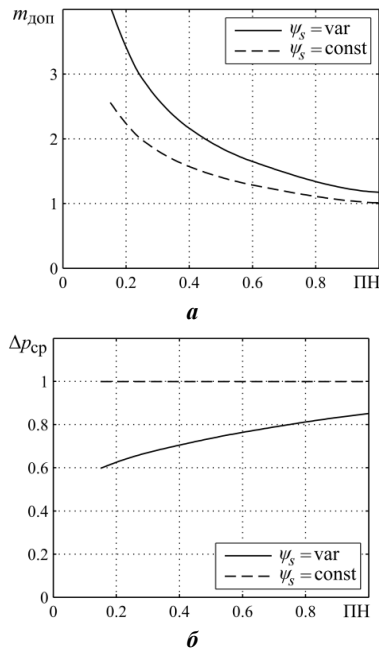


Рис. 4. Зависимости допустимых по нагреву значений момента нагрузки (а) и средних потерь двигателя (б) от величины продолжительности нагрузки

Таким образом, режим управления по минимуму суммарных потерь СД при *переменном магнитном потоке* позволяет повысить нагрузочную способность, то есть допустимый по нагреву момент нагрузки и соответственно мощность двигателя на рабочем интервале.

С точки зрения энергосбережения представляет интерес сопоставление перемежающихся энергетических нагрузочных диаграмм по величине потерь в СД при постоянном и переменном магнитном потоке якоря при условии, что моменты нагрузки в обоих случаях имеют одни и те же значения, допустимые по нагреву при постоянном магнитном потоке якоря. На **рис. 5** представлены нагрузочные диаграммы синхронного электропривода с пропорциональным (а) и пропорционально-интегральным (б) регулятором скорости в перемежающемся режиме работы с постоянным и переменным магнитным потоком якоря.

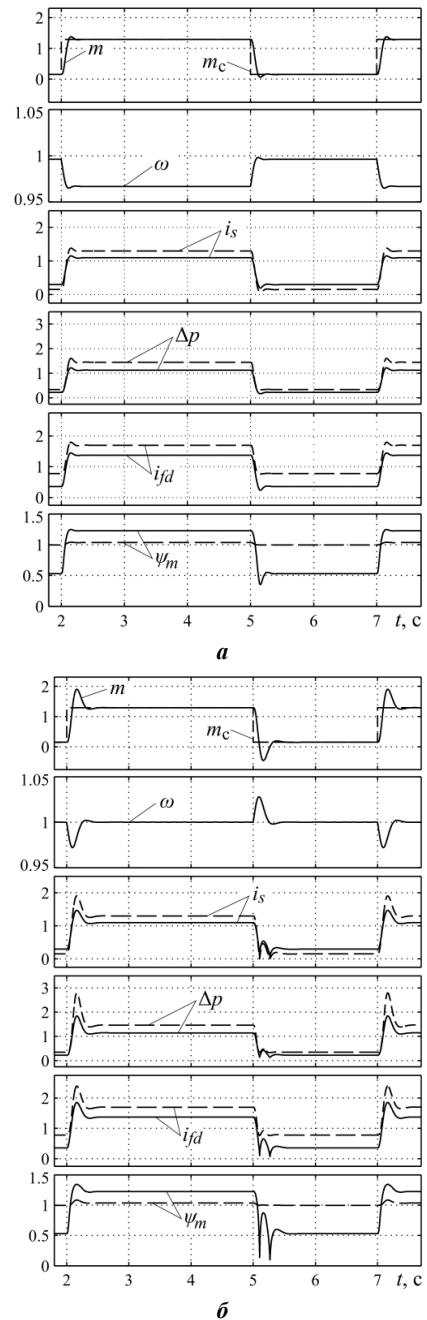


Рис. 5. Нагрузочные диаграммы при работе синхронного двигателя с постоянным и переменным магнитным потоком статора

Продолжительность интервала нагрузки ПН=0,6. Величина нагрузки одна и та же как в случае постоянства магнитного потока статора, так и при его оптимальном регулировании. Как видно, обеспечиваемые электроприводом диаграммы скорости $\omega(t)$ и электромагнитного момента $m(t)$ остаются в обоих случаях неизменными и соответствуют нормированным показателям процессов систем подчиненного регулирования. В то же время, переход к режиму управления с оптимальным регулированием магнитного потока якоря позволяет снизить потери энергии в двигателе Δp_{cp} при одних и тех же нагрузках на валу. Об этом свидетельствуют зависимости средних за цикл потерь в двигателе от времени при-

ложения нагрузки, приведенные на рис. 4, б. Как видно, при ПН=0,25 выигрыш в потерях составляет 34%. Благодаря снижению токов в обмотках якоря и возбуждения (см. рис. 5), потребляемых от преобразователя частоты и преобразователя постоянного тока, потери в этих преобразователях также снижаются. В результате повышается коэффициент полезного действия электропривода, как электромеханического преобразователя энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование режимов оптимального регулирования магнитного потока явнополюсного синхронного двигателя в системе частотно-регулируемого электропривода, работающего в перемежающихся режимах работы, позволяет повысить допустимую по нагреву нагрузочную способность, либо снизить величину потерь мощности в двигателе. Наибольший эффект достигается в области относительно малых значений времени приложения нагрузки. При этом сохраняются условия оптимизации динамических показателей при соответствующем выборе быстродействия САР токов и возможность формирования заданных механических характеристик электропривода.

Важным фактором является также возможность перераспределения электрических потерь между обмотками якоря и возбуждения явнополюсного синхронного двигателя нормальной конструкции с целью снижения нагрева обмотки возбуждения как

наиболее напряженной в термическом отношении части. Ток возбуждения при оптимальном регулировании потока якоря снижается в сравнении с током в режиме постоянства потока якоря.

Вместе с тем следует отметить, что при реализации закона оптимального регулирования магнитного потока якоря в динамичных электроприводах потребуются повышенный запас по напряжению преобразователей. Поэтому закон оптимального регулирования может быть рекомендован для систем управления электроприводов, работающих при сравнительно медленных темпах изменения управляющих и возмущающих воздействий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шрейнер Р.Т., Емельянов А.А., Медведев А.В. Оптимизация перемежающихся режимов работы частотно-регулируемого асинхронного // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып.3: в 5 ч., 2010. Ч.4. С. 158-167.
2. Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов переменного тока / В.Н. Поляков, Р.Т. Шрейнер; под ред. Р.Т. Шрейнера. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», 2012. 220 с.
3. Вейнгер А.М. Регулируемый синхронный электропривод. М.: Энергоатомиздат, 1985. 224 с.
4. Системы подчиненного регулирования в электроприводах переменного тока / О.В. Слежановский, Л.Х. Дацковский, Л.М. Тарасенко, И.С. Кузнецов и др. М.: Энергоатомиздат, 1983. 256 с.

INFORMATION IN ENGLISH

ELECTROMECHANICAL RESOURCE OF VARIABLE-FREQUENCY SYNCHRONOUS DRIVE IN INTERMITTENT MODES OF OPERATION

Shreiner R.T., Polyakov V.N., Medvedev A.V.

Variable-frequency drive based on salient pole synchronous motor is considered in the article. The subject of research is described. A functional diagram and an integrated structural diagram of mathematical model of synchronous drive vector control system are presented. The task of the electric drive study in intermittent operational modes is formulated. Methods of synchronous drive modeling which enable to define the maximum motor temperature loads are described. The results of computer modeling of intermittent operational modes of the motor with continuous and optimal regulation of armature magnetic flux are given. The service life of the salient pole synchronous motor in respect of maximum allowable motor temperature and torque is defined. Comparative analysis of power losses in synchronous motor during operation of frequency-variable synchronous motor in intermittent modes with continuous and optimal regulation of armature magnetic flux is carried out. The conclusion is made about the efficiency of use of optimal armature magnetic flux regulation in vector control systems of synchronous drives that operate in intermittent modes.

Keywords: synchronous electric drive, salient pole motor, intermittent operational modes, overload resource, energy saving.

УДК 62-83: 62-573: 62-892

REFERENCES

1. Shreiner R.T., Emelyanov A.A., Medvedev A.V. *Optimizatsiya peremezhayuschihsvya rezhimov raboti chastotno-reguliruемого asinhronnogo elektroprivoda* [Intermittent operation improvement of variable-frequency induction electric drive]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of TulGU. Technical sciences]. 2010, issue 3, vol.4, pp. 158-167.
2. Polyakov V.N., Shreiner R.T. *Energoeffektivnye rezhimy reguliruemykh elektroprivodov peremennogo toka* [Energy saving operating modes of controlled AC electric drives]. Under the editorship of R.T. Shreiner. Yekaterinburg: FSAEI HPE Russian State Vocational Pedagogical University, 2012. 220 p.
3. Veinger A.M. *Reguliruemyi sinhronnyi elektroprivod* [Controlled synchronous drive]. Moscow: Energoatomizdat, 1985. 224 p.
4. Slezhanovskii O.V., Datskovskii L.Kh., Tarasenko L.M., Kuznetsov I.S., *Sistemi podchinennogo regulirovaniya v elektroprivodah peremennogo toka* [Slave control systems in AC electric drives]. Moscow: Energoatomizdat, 1983. 256 p.