

size of a maximum permissible current of industrial frequency and times of its action, size of pressure of a touch, admissible energy which is absorbed by a body of the person, and parameters of a body of the person is received. The example of practical realization of a design procedure of maximum permissible sizes of pressure of a touch and currents taking into account energy absorbed by a body of the person, for concrete installation with high initial resistance is given. Application of the offered concept and a technique will allow reducing risk of an electro traumatism at the power branch enterprises.

**Keywords:** electric energy, electric safety, maximum permissible levels of pick-up of currents, maximum permissible levels of pick-up voltages, electro installation, standardization, risk.

## REFERENCES

- Zerkalov D. V. Ohorona pratsi v haluzi: Zahalni vymogy: navchalnyi posibnyk [Labour Protection in a Branch], Kyiv, Osnova, Ukraine. (2011), 551 p.
- Bondarenko E. A. Ohorony pratsi: navchalnyi posibnyk, VSTU. Vinnitsa, Ukraine, 1998, 92 p.
- Manoylov B. E. Osnovy elektrobezopasnosti [Basic principles of electro security], Energoatomizdat. Leningrad, Russia, 1991, 480 p.
- Gordon G. U., Weinstein L. I. Electrotravmatizm i ego predupregdenie, Energoatomizdat. Moscow, Russia, 1986, 256 p.
- Malinovskij A. A. Theoretical conditions of increase of level of electric safety, *Girnichia elektromexanika ta avtomatika*, 2004, Vol. 72, pp. 51–56.
- Tkachuk K. N., Khalimovski M. O., Zatsarny V.V. Osnovy ohorony pratsi [Principles of labour Protection]. Kyiv, Osona, Ukraine, 2006, 448 p.
- Belov P. G. Sistemniy analiz s modelirovanie opasnix protsesov v tehnsfere: uchebnoe posobie. Moscow, Akademiya, Russia, 2003, 512 p.
- Bondarenko E. A. The energoentropi concept of an electro security, *Visnyk Vinnitskoho politechnichnoho institutu*, 2012, Vol. 4, pp. 136–138.
- Occupational safety standards system. Electric safety. Maximum permissible levels of pick-up voltages and currents (1985), GOST 12.1.038-82 SSBT. [Entered 1983-07-01], Moscow, Publishing house of standards.
- Bondarenko E. A. Permissible values of voltage touch and currents of industrial Frequency, *Visnyk Vinnitskoho politechnichnoho instytutu*, 2011, Vol. 2, pp. 31–34.
- Bondarenko, E.A. (2012), Determination technique of overload capacity of contact voltage and currents, *European Science and Technology: materials of the 2dn International scientific conference*, Wiesbaden, Germany, May 9th-10th, 2012, Vol. II, pp. 189–193.
- Bondarenko E. A., Yakubovich V. P. *Laborotorniy praktikum z disciplini «Osnovy ohorony pratsi»: navchalnyi posibnyk*, Vinnitsa, VSTU, Ukraine, 2000, 95 p.

УДК 621.313.3

Коцур М. И.

Канд. техн. наук, Запорожский национальный технический университет, Украина, E-mail: kotsur\_m@ukr.net

## ОЦЕНКА ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ С МОДИФИЦИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ ИМПУЛЬСНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Выполнена оценка теплового состояния и ресурса изоляции асинхронного двигателя с фазным ротором в повторно-кратковременном режиме S3 при модифицированной системе импульсного регулирования в зависимости от продолжительности включения и длительности цикла работы. Определена допустимая токовая нагрузка, обеспечивающая номинальный тепловой режим работы двигателя.

**Ключевые слова:** регулирование, асинхронный двигатель, тепловое состояние, изоляция, срок службы.

Для целого ряда промышленных механизмов, в частности кранового и металлургического оборудования, в процессе выполнения производственного цикла требуется осуществление плавного пуска и торможения, а также обеспечение стабильной работы механизма на пониженных скоростях. В этих механизмах используется асинхронный электропривод на базе асинхронного двигателя (АД) с фазным ротором металлургических и крановых серий, работающего в интенсивных повторно-кратковременных режимах (S3 и др.). Эти режимы порождают многообразие тепловых состояний АД, которые определяются различными характеристиками (продолжительностью включения, длительностью цикла и пр.) [1].

Для регулирования частоты вращения АД в этих режимах работы применяется классическая система импульсного регулирования (ИР), которая сочетает в себе простоту схемного решения, хорошие регулировочные свойства и имеет относительно низкую стоимость [2].

В работах [3, 4, 5] предложена модифицированная система импульсного регулирования ИР(м), которая объединяет в себе положительные свойства классической системы ИР и асинхронного вентильного каскада (АВК). Отличительной особенностью системы ИР(м) является наличие импульсного регулятора в цепи выпрямленного тока ротора, выполненного в виде преобразователя повышающего типа и инвертора, который в

отличие от АВК, работает с постоянным минимальным углом инвертирования. За счет этого достигается высокий коэффициент мощности в широком диапазоне скольжения АД, а также появляется возможность рационального выбора параметров оборудования с учетом желаемого коэффициента полезного действия и режимов работы ИР(м), что обеспечивает снижение токовой и тепловой нагрузок по отношению к классической системе ИР [4].

Необходимо отметить, что реальный эксплуатационный режим асинхронного электропривода существенно отличается от условных стандартизированных повторно – кратковременных режимов с продолжительностью цикла 10 мин. (6 включений в час) [1, 6]. Высокая частота включений оказывает существенное влияние на тепловое состояние и эксплуатационную надежность АД. При этом, при заданной диаграмме нагрузок наибольшее влияние на тепловое состояние оказывают продолжительность включения (ПВ) и длительность цикла ( $t_{ц}$ ). Кроме того, с одной стороны, необходимо обеспечить полное использование двигателя по тепловым режимам, а с другой защитить двигатель от перегрузки.

В связи с этим, не исследован вопрос о степени влияния длительности цикла и продолжительности включения на тепловое состояние и ресурс изоляции АД при бесконтактном регулировании, в частности при ИР(м), которые существенным образом влияют на эксплуатационную надежность управляемого АД.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является исследование теплового состояния и оценка ресурса изоляции АД с ИР(м) в повторно-кратковременном режиме работы S3, а также определение допустимых токовых нагрузок АД, в зависимости от продолжительности включения и длительности цикла работы промышленного механизма.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для расчета и анализа теплового состояния АД при ИР(м) использовалась электротепловая модель АД, которая позволяет учесть особенности преобразования энергии электромагнитного поля в тепловую энергию, процессы теплопередачи и теплообмена, в зависимости от режимов работы и частоты вращения АД. Электротепловая модель АД основана на эквивалентной тепловой схеме (ЭТС), которая содержит 45 узлов и в отличие от существующих ЭТС учитывает дискретизацию определяющих элементов изоляции в зависимости от конструктивных особенностей исследуемого АД [7]. Эквивалентная тепловая схема содержит как постоянные, так и переменные теплопроводности элементов, учитывающие изменение условий охлаждения, вызванные изменением частоты вращения АД. Параметры ЭТС рассчитывались по общепринятой методике расчета нагрева АД [8].

Расчет тепловых переходных процессов в АД выполнялся путем решения системы дифференциальных уравнений численными методами.

Для этапов нагрева дифференциальное уравнение теплового баланса для  $i$ -го участка ЭТС АД имеет вид:

$$\frac{d\Theta_{Hi}}{dt} \cdot C_i = \left( - \sum_{j=k}^m R_{ij}^{-1} \right) \cdot \Theta_{Hi} + \dots + \sum_{j=k}^m R_{i,j}^{-1} \cdot \Theta_{Hj} + P_i. \quad (1)$$

Для этапов охлаждения:

$$\frac{d\Theta_{oi}}{dt} \cdot C_i = \left( - \sum_{j=k}^m R_{i,j}^{-1} \right) \cdot \Theta_{oi} + \dots + \sum_{j=k}^m R_{i,j}^{-1} \cdot \Theta_{oj}, \quad (2)$$

где  $j = k, \dots, m$  – номера узлов, имеющих тепловую связь с  $i$ -м участком ЭТС;  $\Theta_i$  – температура  $i$ -го участка ЭТС;  $C_i$  – тепловая емкость  $i$ -го участка ЭТС;  $R_{i,j}^{-1}$  – взаимная тепловая проводимость участков  $i, j$ ;  $P_i$  – тепловые потери, выделяемые в  $i$ -м участке ЭТС.

Величины потерь в узлах АД определялись по данным электромагнитного расчета.

Решение системы уравнений (1) и (2) позволило оценить тепловое состояние в повторно-кратковременном режиме S3 при разных продолжительностях включения и длительностях цикла работы АД.

На рис. 1 приведены расчетные значения максимальной температуры  $\Theta_{max}^*$  наиболее нагреваемого узла (лобовая часть обмотки статора АД МТФ-111-6,  $P_H=3,5$  кВт), в зависимости от длительности цикла работы  $t_{ц}$  для номинального  $s=0,1$  (рис. 1, а) и рабочего  $s=0,9$  (рис. 1, б) скольжений, при стандартных значениях ПВ=0,15; 0,25; 0,40; 0,60; с номинальными коэффициентами токовой нагрузки  $\beta_{ISH}=1,32; 1,17; 1,0; 0,87$  соответственно.

Коэффициент токовой нагрузки определяется из следующего выражения:

$$\beta_{ISH} = \frac{I_{нПВ}}{I_{нПВ=0,4}}, \quad (3)$$

где  $I_{нПВ}$  – значение тока статора при номинальном режиме ПВ;  $I_{нПВ=0,4}$  – значение тока статора при основном номинальном режиме ПВ=0,4.

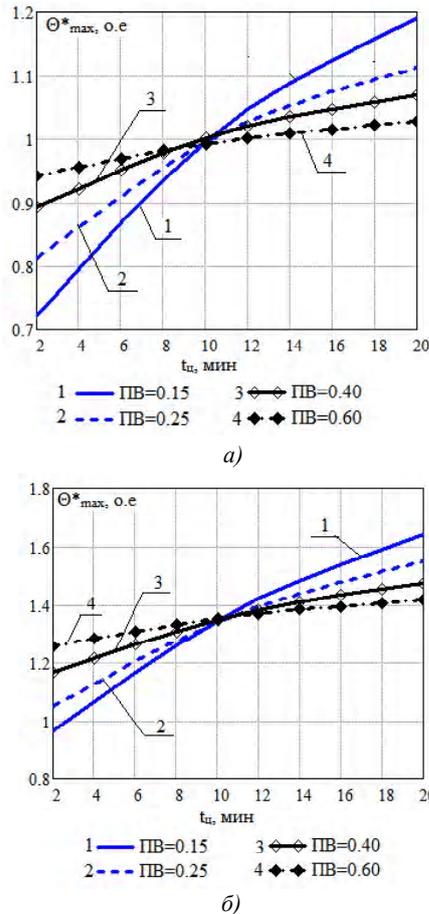


Рис. 1. Зависимости максимальной температуры лобовой части обмотки статора АД МТФ-111-6  $P_H=3,5$  кВт от длительности цикла работы: а) при  $s=0,1$ ; б) при  $s=0,9$

Из рис. 1 следует, что при  $t_{ц}=10$  мин для всех ПВ значения  $\Theta_{max}^*$  соответствуют номинальной, предельно допустимой температуре лобовой части обмотки статора  $\Theta_{max}^*=1,0$  ( $\Theta_H=4,2^\circ\text{C}$ ), для заданного класса нагревостойкости изоляции  $F$ . При  $t_{ц}<10$  мин наибольшая тепловая нагрузка АД имеет место при ПВ=0,6; наименьшая – при ПВ=0,15. При длительности цикла  $t_{ц}>10$  мин наблюдается противоположный характер влияния величины ПВ на тепловую нагрузку АД, что обусловлено изменением условий теплообмена и перераспределения тепловых потоков между элементами ЭТС АД.

Работа системы АД с ИР(м) в диапазоне изменения скольжения от  $s=0,1$  до  $s=0,9$  АД приводит к росту удельного веса гармоник токов статора и ротора, а следовательно к увеличению тепловой нагрузки АД, величина которой прямо пропорционально скольжению [5].

Анализ результатов расчета (рис. 1) показал, что при изменении скольжения от  $s=0,1$  до  $s=0,9$  для  $t_{ц}=10$  мин.  $\Theta_{max}^*$  возрастает в 1,35 раза. Кроме того на временном интервале  $t_{ц}=2...20$  мин диапазон изменения  $\Theta_{max}^*$  расширяется на 10...25% соответственно при изменении ПВ от 0,15 до 0,6.

Оценка ресурса изоляции для повторно-кратковременных режимов работы может быть выполнена по формуле [5]

$$T^* = \frac{T_{\Theta}}{T_{\Theta_H}} = e^{-\frac{\Theta - \Theta_H}{\Delta\Theta}}, \quad (4)$$

где  $T_{\Theta}$  – срок службы изоляции при повышенной температуре  $\Theta^\circ\text{C}$ , лет;  $T_{\Theta_H}$  – базовый срок службы изоляции, (согласно [6], составляет 6 лет);  $\Delta\Theta$  – постоянная величина, зависящая от класса нагревостойкости изоляции,  $^\circ\text{C}$ .

При определении использованного ресурса изоляции оперируют средней температурой изоляции  $\Theta_{cp}$ , которая определяется согласно формуле

$$\Theta_{cp} = \frac{1}{t_{ц}} \cdot \int_0^{t_{ц}} \Theta(t) dt. \quad (5)$$

На рис. 2, а, б приведены зависимости ресурса  $D^*$  межфазной изоляции обмотки статора АД МТФ-111-6 от длительности цикла работы  $t_{ц}$ , соответственно, для скольжений  $s=0,1$  и  $s=0,9$ . Из полученных результатов следует,

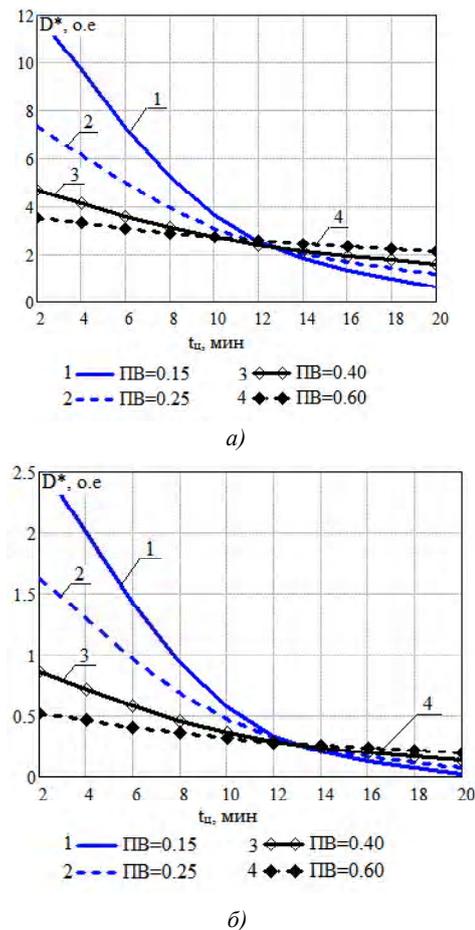


Рис. 2. Зависимости ресурса межфазной изоляции обмотки статора АД МТФ-111-6,  $P_H=3,5$  кВт от длительности цикла работы: а) при  $s=0,1$ ; б) при  $s=0,9$

что с увеличением  $t_{ц}=2...20$  мин при ПВ=0,15 ресурс изоляции снижается в 12 раз для  $s=0,1$  и в 50 раз для  $s=0,9$ . Для ПВ=0,25 соответственно в 5 и 16 раз; для ПВ=0,4 в 2,5 и 3,6 раза; для ПВ=0,6 в 1,75 и 2 раза соответственно.

Поддержание номинального ресурса АД в системе ИР(м), в частности в наиболее уязвимой межфазной изоляции обмотки статора, на уровне  $D^*=1$  может быть обеспечено за счет снижения токовой нагрузки АД, используя коэффициент коррекции.

Коэффициент коррекции токовой нагрузки определяется согласно формуле

$$k_{Is} = \frac{I_{\text{доп.ПВ}}}{I_{\text{ПВ}}}, \quad (6)$$

где  $I_{\text{доп.ПВ}}$  – допустимый ток статора при заданных значениях  $s$  и ПВ, при котором обеспечивается условие  $D^*=1$ ;  $I_{\text{ПВ}}$  – ток статора при заданных значениях  $s$  и ПВ.

На рис. 3, а, б приведены зависимости коэффициента коррекции токовой нагрузки обмотки статора  $k_{Is}$  от дли-

тельности цикла и ПВ (соответственно для  $s=0,1$  и  $s=0,9$ ), при которых обеспечивается номинальный износ изоляции АД.

Таким образом, поддержание тока статора в соответствии с допустимым коэффициентом коррекции токовой нагрузки АД МТФ-111-6 по рис. 3, позволит обеспечить нормальное тепловое состояние в широком диапазоне изменения длительности цикла управляемого АД, а следовательно повысить и эксплуатационную надежность механизма.

### ВЫВОДЫ

Исследование показало, что увеличение длительности цикла и скольжения при работе АД с модифицированной системой ИР в повторно-кратковременном режиме работы S3 приводит к существенному росту температуры АД. В связи с этим, была выполнена оценка ресурса наиболее уязвимой межфазной изоляции обмотки статора, которая показала наибольшее снижение ресурса для ПВ=0,15 в 12 раз – при номинальном скольжении  $s=0,1$ , и в 50 раз – при  $s=0,9$ .

С целью повышения эксплуатационной надежности и поддержания номинального ресурса АД определены коэффициенты коррекции токовой нагрузки обмотки статора АД МТФ-111-6, при ИР(м), работающего в повторно-кратковременном режиме S3 для стандартных ПВ в широком диапазоне изменения длительности цикла механизма.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краново-металлургические электродвигатели [Текст] / [Баталов Н. М., Белый В. А., Иоффе А. Б. и др.]. – М. : Энергия, 1967. – 238 с.
2. Соколов М. М. Асинхронный электропривод с импульсным управлением в цепи выпрямленного тока ротора [Текст] / М. М. Соколов, П. Е. Данилов. – М. : Энергия, 1972. – 72 с.
3. Коцур М. И. Повышение энергоэффективности схемы импульсного регулирования в цепи выпрямленного тока ротора [Текст] / Коцур М. И. // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук : КрНУ, 2011. – № 2 (14). – С. 86–89.
4. Коцур М. И. Особенности выбора балластного сопротивления для схемы импульсного регулирования в цепи выпрямленного тока ротора [Текст] / Коцур М. И. // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – К. : Техніка, 2011. – № 4(80). – С. 56–61.
5. Коцур М. И. Особенности режимов работы модифицированной системы импульсного регулирования асинхронного двигателя с фазным ротором [Текст] / М. И. Коцур, П. Д. Андриенко, И. М. Коцур // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук : КрНУ, 2012. – № 3(19) – С. 163–165.
6. Андриенко П. Д. Анализ термической стойкости изоляции асинхронного двигателя с фазным ротором при разных способах управления [Текст] / П. Д. Андриен-

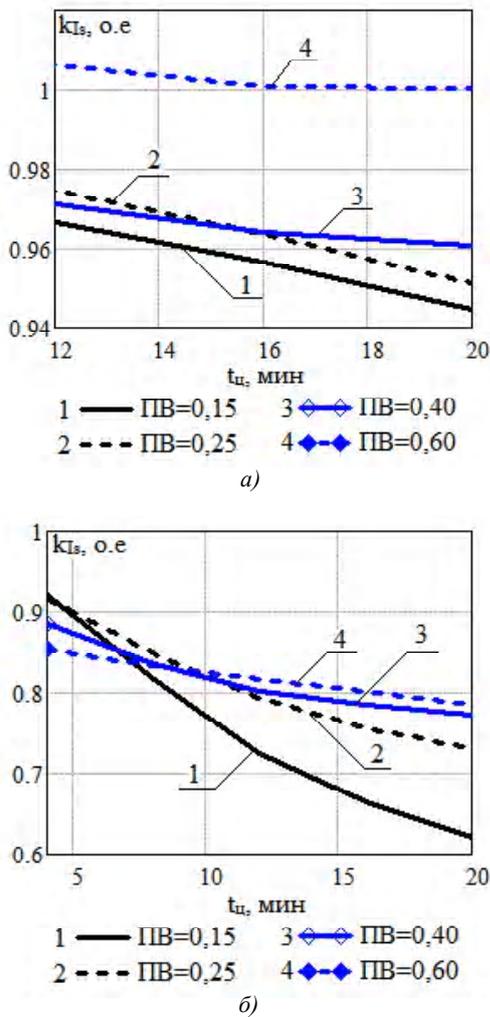


Рис. 3. Зависимости коэффициентов коррекции токовой нагрузки обмотки статора АД МТФ-111-6,  $P_H=3,5$  кВт от длительности цикла работы: а) при  $s=0,1$ ; б) при  $s=0,9$

ко, И. М. Коцур, М. И. Коцур // Электротехнічні та комп'ютерні системи. – К. : Техніка, 2011 – № 3 (79). – С. 420–422.

7. Коцур М. И. Оценка ресурса системы изоляции управляемого асинхронного двигателя с фазным ротором в подсинхронном диапазоне частоты вращения ротора [Текст] / М. И. Коцур, П. Д. Андриенко,

И. М. Коцур // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 5/8(53). – С. 41–45.

8. Сипайлов Г. А. Тепловые гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах [Текст] / Г. А. Сипайлов, Д. И. Санников, В. А. Жадан. – М. : Высш. шк., 1989. – 240 с.

*Стаття надійшла до редакції 12.12.2012.*

*Після доробки 22.02.2013.*

Коцур М. И.

Канд. техн. наук, старший викладач, Запорізький національний технічний університет, Україна

#### **ОЦІНКА ТЕПЛООВОГО СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ФАЗНИМ РОТОРОМ З МОДИФІКОВАНОЮ СИСТЕМОЮ ІМПУЛЬСНОГО РЕГУЛЮВАННЯ**

*Виконана оцінка теплового стану й ресурсу ізоляції асинхронного двигуна з фазним ротором у повторно – короткочасному режимі S3 при модифікованій системі імпульсного регулювання у залежності від тривалості включення й циклу роботи. Визначено допустиме струмове навантаження, яке забезпечує номінальний тепловий режим роботи двигуна.*

**Ключевые слова:** регулювання, асинхронний двигун, тепловий стан, ізоляція, термін служби.

Kotsur M. I.

PhD, lector, Zaporozhzhie National Technical University, Ukraine

#### **ESTIMATION OF ISOLATION THERMAL STATE OF ASYNCHRONOUS MOTOR WITH PHASE ROTOR AT PULSE CONTROL MODIFIED SYSTEM**

*Currently there is no information about level of cycle time effect and duration of operating period on a thermal state and isolation live time of AD motor at modified pulse control system (MPCS), which essentially influences on service reliability of the AD motor. The aim of investigation is the thermal state and the estimation of isolation live time of the AD motor at MPCS, and also determination of the AD motor ampacity in dependence on operating parameters of mechanisms.*

*The electro thermal model which allows considering peculiarities of electromagnetic energy transformation in thermal energy, heat transferring and heat interchanging processes was used for calculation and the analysis of the thermal state of the AD motor at MPCS.*

*The investigation proves that the magnification of duration cycle time and a slip at the moment of the AD motor with MPCS leads to essential growth of its temperature. Hence, the estimation of isolation live time of the AD motor which displayed lowering of the isolation live time indexes to 12 times – at the rated slip  $s=0,1$ , and to 50 times – at  $s=0,9$ . Coefficients of correction of the AD motor ampacity at MPCS are defined, supporting its rated thermal conditions.*

**Keywords:** regulation, asynchronous motor, thermal state, isolation, live time.

#### **REFERENCES**

1. Batalov N. M., Belyj V. A., Ioffe A. B. and other Kranovometallugricheskie ielectrodvigateli [Text ], Moscow, E'nergiya, 1967, 238 p. [ in Russian ].
2. Sokolov M. M., Danilov P. E. Asynchronous electric drive with impulse control in the rectified-current circuit of the rotor [Text]. Moscow, E'nergiya, 1972, 72 p. [in Russian].
3. Kotsur M. I. Improving energy efficiency schemes in the pulse control circuit of rectified rotor current [Text], *Electromechanical and energy saving systems*, Kremenchuk, KrNU, 2011, No. 2 (14), pp. 86–89 [in Russian].
4. Kotsur M. I. Ballast resistance for impulsive adjusting scheme in chain of straightened current of the rotor choice peculiarities [Text], *Electrotechnic and computer system*, Kiev, Texnika, 2011, No. 4(80), pp. 56–61 [in Russian].
5. Kotsur M. I., Andrienko P. D., Kotsur I. M. Operation modes features of modificate pulse control system of asynchronous motor with phase rotor [Text], *Electromechanical and energy saving systems*, Kremenchuk, KrNU, 2012, No. 3 (19), pp. 163–165 [in Russian].
6. Andrienko P. D., Kotsur I. M., Kotsur M. I. Thermal stability asynchronous motor with phase rotor isolation analysis for different type of control drives system [Text], *Electrotechnic and computer system*. Kiev, Texnika, 2011, No. 3 (79), pp. 420–422 [in Russian].
7. Kotsur M. I., Andrienko P. D., Kotsur I. M. Estimation of isolation system resource drive's asynchronous motor with phase rotor in sub synchronous frequency rotation, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2011, No. 5/8(53), pp. 41–45. [in Russian].
8. Sipajlov G. A., Sannikov D. I., Zhadan V. A. Teplovy'e gidravlicheskie i ae'roodinamicheskie paschyoty' v e'lektricheskix mashy'nax [Text]. Moscow, Vy'ssh. Shk., 1989, 240 p. [in Russian].