

УДК 621.313

М.И. Коцур

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА БАЛЛАСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ СХЕМЫ ИМПУЛЬСНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В ЦЕПИ ВЫПРЯМЛЕННОГО ТОКА РОТОРА

Аннотация. Предложена модифицированная схема импульсного регулирования в цепи выпрямленного тока ротора представляющая собой симбиоз классической схемы импульсного регулирования и асинхронного вентильного каскада. Предложены рекомендации по выбору рационального значения балластного сопротивления по критерию постоянства теплового режима асинхронного двигателя. Выполнен сравнительный анализ энергетических показателей разных способов управления.

Ключевые слова: двигатель, ротор, управление, балластное сопротивление, энергетические показатели.

M.I.Kotsur

BALLAST RESISTANCE FOR IMPULSIVE ADJUSTING SCHEME IN CHAIN OF STRAIGHTENED CURRENT OF THE ROTOR CHOICE PECULIARITIES

Abstract. The modified chart of the impulsive adjusting in the chain of the straightened current of the rotor presenting symbiosis between the classic chart of the impulsive adjusting and asynchronous valve cascade is offered. The recommendations on choice of the optimal value of ballast resistance on the criterion of constancy of the thermal mode asynchronous motor are offered. The comparative analysis of power indexes is conducted between the different type of control system.

Keywords: motor, rotor, drive control, ballast resistance, efficiency.

М.І.Коцур

ОСОБЛИВОСТІ ВИБОРУ БАЛАСТНОГО ОПОРУ ДЛЯ СХЕМИ ІМПУЛЬСНОГО РЕГУЛЮВАННЯ В ЛАНЦЮГУ ВИПРЯМЛЕНОГО СТРУМУ

Анотація. Запропоновано модифіковану схему імпульсного регулювання в ланцюгу випрямленого струму ротора, яка являє собою симбіоз класичної схеми імпульсного регулювання та асинхронного вентильного каскаду. Наведено рекомендації щодо вибору раціонального значення баластного опору за критерієм сталості теплового режиму асинхронного двигуна. Виконано порівняльний аналіз енергетичних показників різних засобів керування.

Ключові слова: двигун, ротор, керування, баластний опір, енергетичні показники.

Введение. В связи с массовым использованием асинхронных двигателей (АД) с фазным ротором на кранах всех видов, а также на металлургических приводах и других механизмах с продолжительным и повторно – кратковременным режимами работы, существует необходимость постоянного совершенствования конструктивных исполнений схем управления со стороны ротора. К основным существующим способам управления АД с фазным ротором относятся резисторно–ступенчатое управление (PCY), классическая схема импульсного регулирования (ИРк) в цепи выпрямленного тока ротора, а также асинхронный вентильный каскад (ABK) [1,3].

Особый интерес представляет классическая схема ИР в цепи выпрямленного тока ротора, отличающаяся простотой конструктивного исполнения, высокой плавностью регулирования в широком диапазоне частоты

вращения ротора АД несколько ниже синхронной. Однако, использование ИР(к) приводит к появлению перенапряжения в обмотке ротора, связанного с резким изменением тока, вызванного частой коммутацией силового ключа, что приводит к значительному повышению токовой нагрузки обмоток статора и ротора АД [7,8].

В работе [5] автором была предложена схема импульсного управления со сбросом энергии скольжения ротора в сеть (ИРэ). Особенностью данной схемы управления является использование блока импульсного преобразователя повышающего типа в цепи выпрямленного тока ротора, позволяющего исключить балластный резистор. При этом, энергия, накопленная в обмотке ротора, вызывающая перенапряжение, сбрасывается на конденсатор, этим самым заряжая его. В процессе разряда конденсатора, запасенная энергия на нем сбрасывается в сеть энерго-снабжения. В отличие от ABK, сброс энергии в сеть производится при фиксированном минимальном угле управления инверто-

© Коцур М.И., 2011

ром, при котором обеспечивается минимальное потребление реактивной мощности из сети, что приводит к повышению коэффициента мощности привода. Однако для данных схем ИР(э) и АВК установочная мощность инвертора зависит от номинальной мощности АД и в некоторых случаях может достигать ее величины. Поэтому актуальной задачей является модификация схемы ИР, представляющая собой симбиоз ИР(к) и АВК.

Целью работы является определение рационального значения балластного сопротивления, обеспечивающего минимальное значение установочной мощности инвертора, по критерию постоянства теплового режима АД на допустимом уровне для модифицированной схемы ИР.

Материал и результаты исследований. Предложена модифицированная схема ИР с возвратом энергии накопленной в обмотке ротора в сеть энергоснабжения (ИРм) (рис.1).

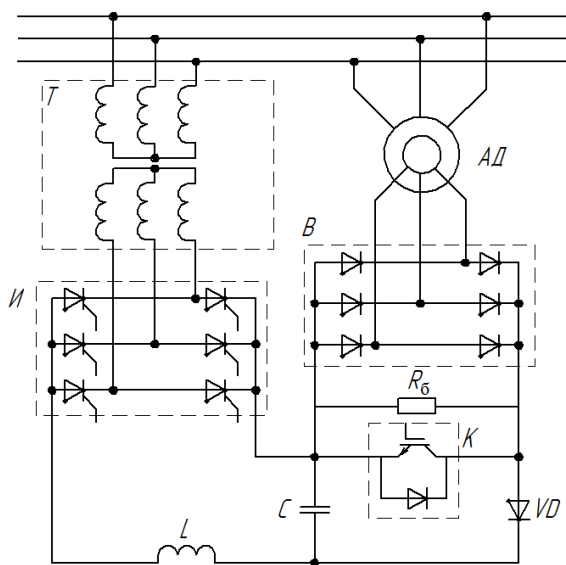


Рис.1. Схема импульсного регулирования со сбросом накопленной энергии в обмотке ротора в сеть энергоснабжения

Конструктивным отличием предложенной схемы ИР(м) от схемы ИР со сбросом энергии скольжения ротора в сеть [5] является наличие балластного резистора R_6 .

Чтобы энергия, запасенная в обмотке ротора, сбрасывалась только на конденсатор, необходимо выполнение условия согласо-

вания ЭДС ротора E_{d0} с внутренней ЭДС инвертора $U_{2T} \cos \beta$ (рис.2).

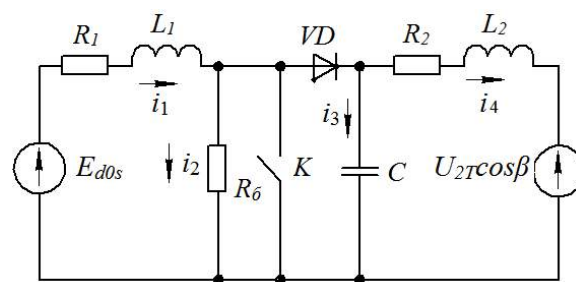


Рис. 2. Схема замещения импульсного управления со сбросом накопленной энергии ротора в сеть

Для данной схемы замещения ИР свойственны два состояния, определяющие переходные процессы в разные моменты времени [7].

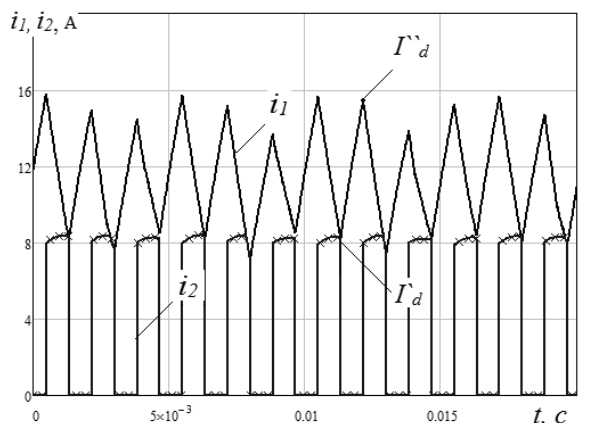
Первое состояние схемы определяется при замкнутом силовом ключе. Первый контур схемы замещения ($R_1 - L_1 - R_6 - R_1$) соответствует замкнутому состоянию обмотки ротора, второй контур ($C - R_2 - L_2 - C$) – процессу разряда конденсатора с последующим сбросом энергии в сеть. Второе состояние схемы определяется при разомкнутом силовом ключе. В этот момент времени энергия, накопленная в обмотке ротора сбрасывается на конденсатор (контур $R_1 - L_1 - C - R_1$), а основная составляющая энергии скольжения рассеивается в виде тепла на балластном резисторе (контур $R_1 - L_1 - R_6 - R_1$).

Для схемы замещения (рис. 2) была составлена математическая модель, описывающая переходные процессы в цепи выпрямленного тока ротора АД [4].

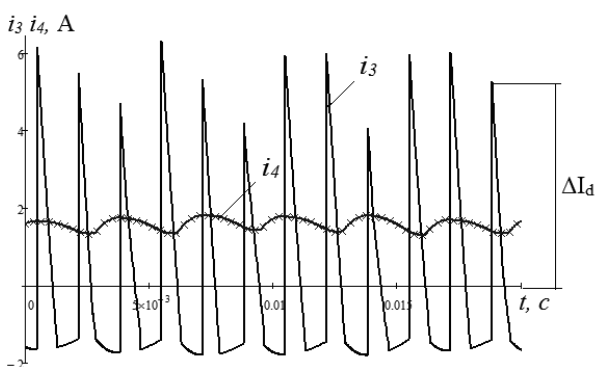
На рис.3 представлен фрагмент математического моделирования переходных процессов в цепи выпрямленного тока ротора в квазиустановившемся состоянии АД МТФ-111-6. ($P_H = 3,5$ кВт частота коммутации ключа $f_k = 600$ Гц, скважность $\gamma = 0,48$, $n = 400$ об/мин, угол управления инвертором $\beta = 10$ и $R_6 = 50 \Omega$). Величина пульсации выпрямленного тока ротора $\Delta I_d = 6$ А, которая определяется разностью между максимальным и минимальным значениями выпрямленного тока:

$$\Delta I_d = \Gamma_d'' - \Gamma_d' \quad (1)$$

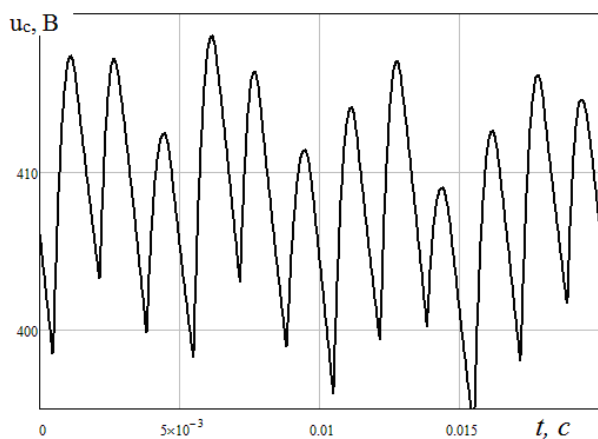
С увеличением частоты коммутации f_k , согласно [5] пульсация выпрямленного тока ротора ΔI_d уменьшается.



а



б



в

Рис. 3. Фрагмент переходных процессов в цепи выпрямленного тока ротора при квазиустановившемся режиме АД: а – ток i_1 выпрямителя, ток i_2 через резистор R_{δ}^* ; б – ток конденсатора i_3 , ток дросселя инвертора i_4 ; в – напряжение на конденсаторе u_c

При этом значение сопротивления R_{δ} подбиралось таким образом, чтобы полная величина энергии запасенной в обмотке ротора $L \frac{d\Delta I_d^2}{dt} f_k$ сбрасывалась на конденсатор, что определяется равенством $I_{R\delta} = \Gamma_d$ (рис.3, а, б). В противном случае, энергия, запасенная в обмотке ротора, приводит к росту токовой нагрузки обмоток статора и ротора. На рис. 4 представлена зависимость среднего значения тока статора от R_{δ}^* при рабочем скольжении $s = 0,9$. Значение R_{δ}^* , определяется из соотношения

$$R_{\delta}^* = \frac{R_{\delta}}{R_{н.р}}, \quad (2)$$

где $R_{н.р}$ – номинальное сопротивление ротора [2]:

$$R_{н.р} = \frac{E_{р.н}}{\sqrt{3} \cdot I_{р.н}}, \quad (3)$$

где $E_{р.н}$ – ЭДС ротора при неподвижном роторе; $I_{р.н}$ – номинальный ток ротора.

Для исследуемого АД $R_{н.р} = 6$ Ом.

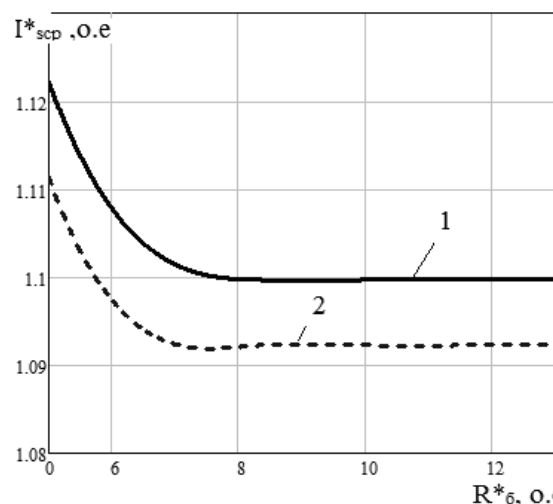


Рис. 4. Зависимость среднего значения тока статора от R_{δ}^* при $s = 0,9$:

1 – $f_k = 600$ Гц; 2 – $f_k = 3000$ Гц.

Сохранение тепловой нагрузки АД на допустимом уровне, достигается постоянством среднего значения тока статора. Увеличение частоты коммутации f_k приводит к снижению ΔI_d , следовательно, и величины энергии запасенной в обмотке ротора. При этом на конденсатор сбрасывается уже не только энергия, накопленная в обмотке ротора $L \frac{d\Delta I_d^2}{dt} f_k$, но и часть основной энергии скольжения ротора $\frac{E_d 0 s^2}{R_{\sigma}}$. Для того чтобы снова выполнялось равенство $I_{R\sigma} = I_d$, необходимо снизить величину балластного сопротивления.

Таким образом, снижение и поддержание токовой нагрузки на допустимом уровне выполняется:

$$\text{при } f_k = 600 \text{ Гц и } R_{\sigma}^* \geq 8,2 R_{н.р} ;$$

$$\text{при } f_k = 3000 \text{ Гц и } R_{\sigma}^* \geq 6,8 R_{н.р} .$$

При дальнейшем увеличении R_{σ}^* по-

стоянство тепловой нагрузки АД не нарушается.

Согласно методике [6,7] были рассчитаны энергетические показатели привода ИР(к), ИР(м) и РСУ при разных значениях частоты коммутации f_k и рабочих скольжениях s (рис.5, табл.).

Анализ результатов показал, что при ИР(э) и при ИР(м) величина коэффициента мощности привода стабильно высокая на всем диапазоне рабочего скольжения, но при этом незначительно ниже коэффициента мощности АД за счет дополнительного потребления реактивной мощности инвертором. Снижение коэффициента мощности с ростом рабочего скольжения вызвано увеличением коэффициента гармоник токов статора и ротора.

Так как, при ИР(м) сбрасывается в сеть энергия запасенная в обмотке ротора, то КПД привода выше, чем при ИР(к) и РСУ.

С увеличением частоты коммутации f_k , величина энергии запасенной в обмотке ротора снижается, что приводит к уменьшению значения КПД привода ИР(м).

1. Коэффициенты полезного действия η , % при разных способах управления

| Управление | s, o.e | | | | | | | | | |
|---|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | |
| РСУ | 77,1 | 69,1 | 60,6 | 52,1 | 43,5 | 35,0 | 26,3 | 17,6 | 8,9 | |
| ИР(к) при $f_k = 600$ Гц ($R_{\sigma}^* = 4,5 R_{н.р}$) | 77,1 | 68,5 | 59,6 | 50,8 | 42,2 | 33,7 | 25,1 | 16,7 | 8,2 | |
| ИР(к) при $f_k = 3000$ Гц ($R_{\sigma}^* = 4,5 R_{н.р}$) | 77,1 | 68,9 | 60,1 | 51,3 | 42,7 | 34,0 | 25,4 | 17,0 | 8,4 | |
| ИР(м) при $f_k = 600$ Гц ($R_{\sigma}^* = 8,2 R_{н.р}$) | 77,1 | 70,0 | 64,0 | 57,7 | 52,3 | 46,1 | 39,8 | 31,7 | 25,6 | |
| ИР(м) при $f_k = 3000$ Гц ($R_{\sigma}^* = 6,8 R_{н.р}$) | 77,1 | 69,4 | 61,0 | 52,8 | 46,1 | 37,9 | 28,8 | 20,9 | 17,8 | |

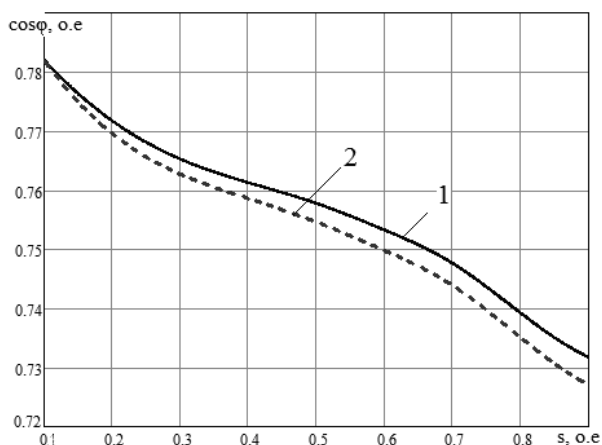


Рис.5. Зависимость $\cos\varphi=f(s)$:

1 – $\cos\varphi$ двигателя при ИР(м) с $f_k = 3000$ Гц;
2 – $\cos\varphi$ привода при ИР(м) с $f_k = 3000$ Гц.

На рисунках 6 и 7 приведены зависимости коэффициента полезного действия привода и относительного значения мощности инвертора от R^*_{δ} при $s = 0,9$ для $f_k = 600$ Гц и $f_k = 3000$ Гц.

Анализ показал, что с ростом R^*_{δ} снижается величина тока через резистор, что приводит к увеличению количества сбрасываемой энергии в сеть. При этом растут коэффициент полезного действия привода и установочная мощность инвертора. Частота коммутации ключа f_k не оказывает существенного влияния на величину коэффициента

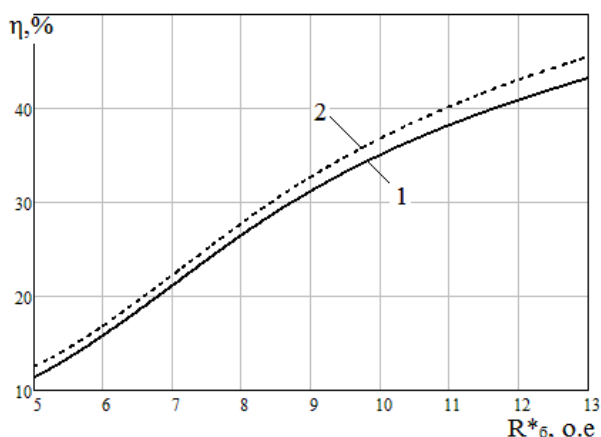


Рис.6. Зависимость коэффициента полезного действия от R^*_{δ} при $s = 0,9$ для:
1 – $f_k = 600$ Гц.; 2 – $f_k = 3000$ Гц.

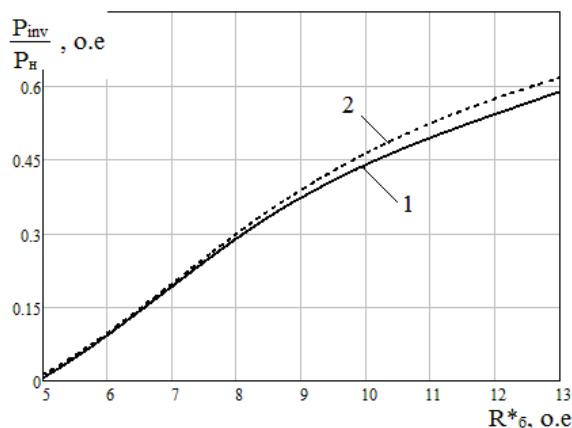


Рис.7. Зависимость установочной мощности инвертора от R^*_{δ} при $s = 0,9$ для:
1 – $f_k = 600$ Гц.; 2 – $f_k = 3000$ Гц.

полезного действия и установочную мощность инвертора при фиксированном значении R^*_{δ} .

Критерием минимизации установочной мощности инвертора является выполнение условия $I_{R\delta} = I_d$, при котором сохраняется токовая, а также и тепловая нагрузка обмоток АД.

Следовательно, для $R^*_{\delta} = 8,2 R_{н.р}$ с $f_k = 600$ Гц установочная мощность инвертора составляет $P^*_{inv} = 0,29 P_n$; для $R^*_{\delta} = 6,8 R_{н.р}$ с $f_k = 3000$ Гц – $P^*_{inv} = 0,1 P_n$.

Таким образом, при ИР(м) в сравнении с ИР(к) для МТФ-111-6 с $P_n = 3,5$ кВт при $s = 0,9$, при $R^*_{\delta} = 6,8 R_{н.р}$, $f_k = 3000$ Гц обеспечивается снижение значения среднего тока статора на 0,4 А, увеличивается КПД на 9,4 %, что требует применения инвертора с установочной мощностью $P_{inv} = 350$ Вт.

Выводы. Предложена методика определения рационального значения сопротивления балластного резистора, обеспечивающего минимальное значение установочной мощности инвертора, при котором сохраняется токовая и термическая нагрузка обмоток статора и ротора АД на оптимальном допустимом уровне.

Показано, что дальнейшее увеличение значения балластного сопротивления, при котором обеспечивается постоянство токовая и термическая нагрузка обмоток статора и ротора АД на оптимальном допустимом уровне, приводит к росту коэффициента полезного действия и установочной мощности инвертора.

Для крановых приводов, работающих с относительно небольшим значением ПВ, а также механизмов у которых по характеру работы потери энергии скольжения составляют незначительную долю от общего расхода электроэнергии, целесообразно применение схемы ИР(м) с минимальной установочной мощностью инвертора. Для приводов, работающих в продолжительном режиме работы предпочтительнее использовать ИР со сбросом полной энергии скольжения ротора в сеть.

Список использованной литературы

1. Автоматизированный электропривод промышленных установок / Г.Б.Онищенко, М.И. Аксенов, В.П. Грехов и др.; под общ. ред. Онищенко Г.Б. – М.: РАСХН, 2001. – 520 с.
2. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе [Текст] / С.Н. Вешеневский. – М.: Энергия, 1977. – 431 с.
3. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / И.Я.Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков; под общ. ред. И.Я.Браславского. – М.: Издат. центр Академия, 2004. – 256 с.
4. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем / С.Г.Герман-Галкин. – Санкт-Петербург: 2001. – 320 с.
5. Коцур М.И. Повышение энергоэффективности схемы импульсного регулирования в цепи выпрямленного тока ротора [Текст] / М.И. Коцур // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – Кременчук: КрНУ. – 2011. – № 2(14). – С. 86-89.
6. Парфенов Э.Е. Вентильные каскады / Э.Е. Парфенов, В.А. Прозоров; – Л.: Энергия, 1968. – 92 с.

7. Соколов М.М. Асинхронный электропривод с импульсным управлением в цепи выпрямленного тока ротора / М.М. Соколов, П.Е. Данилов. – М.: Энергия, 1972. – 72 с.

8. Ledwich G. Transient loss minimization for induction motors with variable speed drive [Text]. / G. Ledwich // *J. Elec. and Electron. Eng. Austral.* 1987, 7. – № 3. – P. 190-192.

Получено 20.11.2011

References

1. Onishchenko G.B, Aksenov M., Sin V. and others. Automatic Electric industrial plants / under gen. Ed. Onishchenko G.B. – Moscow: Agricultural Sciences, 2001. – 520 p. [in Russian].
2. Veshenevsky S.N. The performance of engines in electric [Text]. – Moscow: Energiya, 1977. – 431 p. [in Russian].
3. Braslavsky I.J., Ishmatov Z.Sh., Poles V.N. under Society. Ed. Braslavsky I.J. Energyefficient asynchronous electric: Textbook. allowance for stud. Vyssh. Textbook. institutions – Moscow: Publisher-sky center Academy, 2004. – 256 p. [in Russian].
4. German Galkin S.G. Computer simulation of semiconductor systems. – St.Petersburg: 2001. – 320 p. [in Russian].
5. Kotsur M.I. Improving energy efficiency schemes in the pulse control circuit of rectified rotor current [Text]. *Elektromehanichni energozberigayuchi system*. – Kremenchuk: KrNU. – 2011. – № 2 (14). – P.86–89 [in Russian].
6. Parfenov E. E., Prozorov B.A. Valve cascades. – L.: Energy, 1968. – 92 p. [in Russian].
7. Sokolov M.M., Danilov P.E. Asynchronous electric drive with impulse control in the rectified-current circuit of the rotor. – M.: Energiya, 1972. – 72 p. [in Russian].
8. Ledwich G. Transient loss minimization for induction motors with variable speed drive [Text]. // *J. Elec. and Electron. Eng. Austral.* 1987, 7. – № 3. – P.190–192 [in English].



Коцур
Михаил Игоревич,
аспирант каф. эл. снабжения
пром. предприятий
Запорожского нац. тех.
нич. у-та
м/т 050-676-02-92