

## ОСОБЕННОСТИ УДАРНОГО ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С МОДИФИЦИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ ИМПУЛЬСНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ЧАСТЫХ ПУСКОВ

*Проведена сравнительная оценка скорости нарастания температуры не управляемого асинхронного двигателя с фазным ротором и с модифицированной системой импульсного регулирования в цепи ротора в условиях частых пусков, в зависимости от интенсивности его разгона. Разработаны рекомендации по оптимальному управлению асинхронным двигателем с модифицированной системой импульсного регулирования, обеспечивающие наилучший тепловой режим при его пуске.*

**Ключевые слова:** регулирование, асинхронный двигатель, температура, пуск, импульс.

### ВВЕДЕНИЕ

При работе крановых асинхронных двигателей (АД) с фазным ротором со значительными периодическими кратковременными нагрузками имеют место пики температуры, которые являются опасными для изоляции обмоток не управляемого АД и могут привести к их разрушению. Из-за большей инерционности системы приводов тяжелых быстроходных мостов, тепловой режим АД в течение нескольких пусков может оказаться выше допустимого, даже если в среднем за продолжительный период частота пусков не превышает допустимого значения. Быстрое повышение температуры обмоток при кратковременных перегрузках объясняется двумя причинами. Во-первых, потери в меди в большей степени возрастают пропорционально квадрату момента. Во-вторых, при кратковременном выделении в обмотках большого количества потерь основная их часть поглощается за счет теплоемкости самой обмотки. При этом теплопередача от обмотки к сердечнику или другим частям АД затруднена. Следствием недооценки значения этого явления бывает систематический выход АД из строя при относительно небольшой средней нагрузке [1, 2].

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время применяется ряд современных систем регулирования АД, обеспечивающих не только повышение энергетических показателей, но и плавность переходных процессов, за счет которых достигается снижение пикового (ударного) теплового воздействия на активные элементы конструкции АД во время его пуска.

В работе [3] предложена модифицированная система импульсного регулирования (ИР) (рис. 1), имеющая ряд положительных свойств по сравнению с существующими системами регулирования в цепи выпрямленного тока ротора АД (классическая система импульсного регулирования и асинхронный вентильный каскад).

Регулирование частоты вращения ротора, как и в классической системе, выполняется за счет изменения коэф-

фициента заполнения импульса ( $\gamma$ ) при постоянной частоте коммутации силового ключа. При этом интенсивность разгона АД зависит от скорости изменения  $\gamma$ .

В настоящее время не достаточно исследован вопрос определения оптимальной скорости изменения  $\gamma$  в процессе разгона АД с модифицированной системой ИР, при которой величина ударной составляющей интенсивности тепловыделения имеет наименьшее значение.

**Целью работы** является оценка скорости нарастания температуры обмотки статора АД с модифицированной системой ИР в условиях частых пусков, в зависимости от интенсивности его разгона.

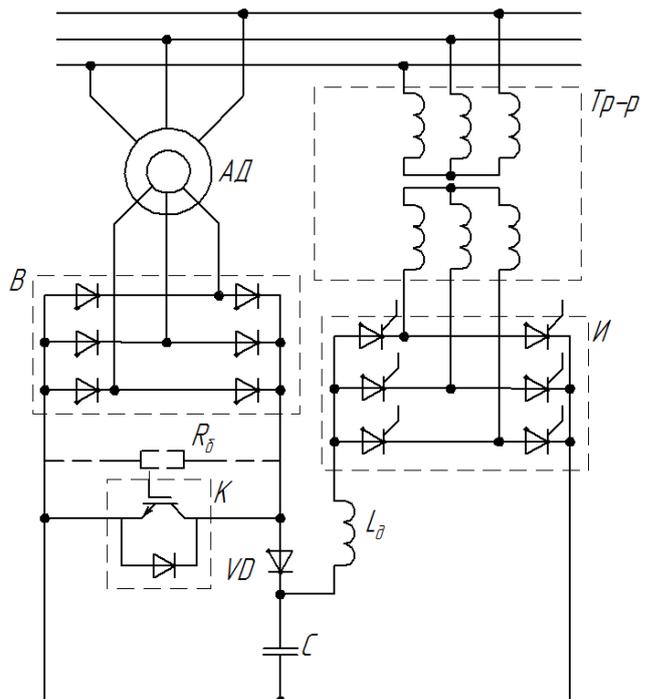


Рис. 1. Модифицированная система ИР

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Для проведения оценки скорости нарастания температуры АД с модифицированной системой ИР, в зависимости от интенсивности его разгона, в среде MatLAB, с помощью структурных средств Simulink, разработана комплексная имитационная модель электромагнитных и тепловых процессов асинхронного привода. На рис. 2. данная модель представлена в виде блок-схем электромагнитной модели АД с фазным ротором канала регулирования в цепи выпрямленного тока ротора и электротепловой модели АД.

Электромагнитная модель АД представлена в виде известных дифференциальных уравнений с общепринятыми допущениями [4].

Блок цепи выпрямленного тока ротора представлен в виде системы дифференциальных уравнений в зависимости от состояния силового ключа (IGBT транзистора) согласно приведенной схеме замещения цепи выпрямленного тока ротора с ИР на рис. 3.

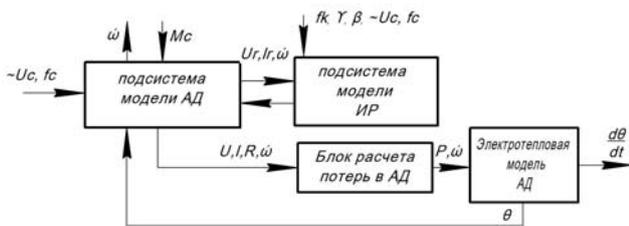
В случае, когда силовой ключ замкнут

$$R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} = 1,35 \cdot E_{рн} \cdot s, \tag{1}$$

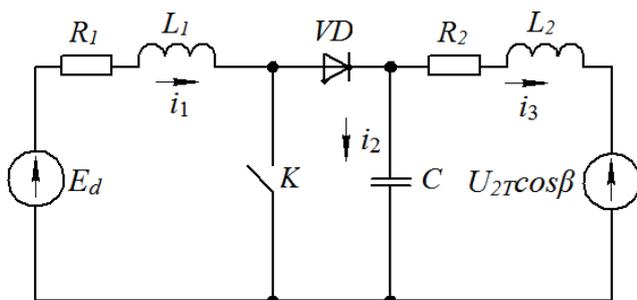
$$R_2 = r_{др} + 2 \cdot r_r + \frac{3 \cdot x_T \cdot s}{\pi}, \tag{2}$$

$$R_1 = 2 \cdot (r_s + r_m) \cdot s + 2 \cdot r_r + \frac{3 \cdot x_D \cdot s}{\pi}, \tag{3}$$

$$L_1 = 2 \cdot L_D, \tag{4}$$



**Рис. 2.** Имитационная модель асинхронного привода для комплексного исследования электромагнитных и тепловых процессов в АД



**Рис. 3.** Схема замещения цепи выпрямленного тока ротора для модифицированной системы ИР

$$L_2 = L_{др} + 2 \cdot L_T, \tag{5}$$

$$x_D = x_s + x_r = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (L_s + L_r), \tag{6}$$

где  $E_{рн}$  – номинальное значение ЭДС ротора АД;  $s$  – скольжение ротора АД;  $r_{др}$  – активное сопротивление дросселя инвертора;  $L_{др}$  – индуктивность дросселя инвертора;  $r_r$  – активное сопротивление фазы ротора АД;  $L_r$  – полная индуктивность фазы ротора;  $r_s$  – активное сопротивление фазы статора, приведенное к обмотке ротора АД;  $L_s$  – полная индуктивность фазы статора, приведенная к ротору АД;  $r_m$  – сопротивление магнитного контура АД;  $r_T, x_T$  – соответственно активное и индуктивное эквивалентные сопротивления фазы согласующего трансформатора;  $\frac{3 \cdot x_D \cdot s}{\pi}$  – эквивалентное сопротивление, вызванное коммутацией вентилях выпрямителя;  $\frac{3 \cdot x_T \cdot s}{\pi}$  – эквивалентное сопротивление, вызванное коммутацией вентилях инвертора.

В случае, когда силовой ключ разомкнут,

$$\left. \begin{aligned} R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_2 dt &= E_{d0} \cdot s, \\ R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_3}{dt} + R_2 \cdot i_3 &= E_{d0} \cdot s + \\ + U_{2T} \cdot \cos \beta, \\ i_1 &= i_2 + i_3, \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

где  $U_{2T}$  – напряжение вторичной обмотки согласующего трансформатора;  $\beta$  – фиксированный угол инвертирования.

В блоке расчета основных и дополнительных тепловых потерь в сердечниках и обмотках статора и ротора АД используются общеизвестные уравнения из [2, 5].

Электротепловая модель АД описывает тепловые переходные процессы между элементами конструкции АД и позволяет учесть особенности преобразования энергии электромагнитного поля в тепловую энергию, а также процесс теплопередачи и теплообмена [6, 7, 8, 9]. Электротепловая модель АД основана на эквивалентной тепловой схеме (ЭТС), которая содержит как постоянные, так и

переменные теплопроводности элементов, учитывающие изменение условий охлаждения, вызванные изменением частоты вращения АД. Параметры ЭТС рассчитывались по общеизвестной методике расчета нагрева АД [2].

Расчет тепловых переходных процессов в АД выполнялся путем решения системы дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты, а именно,

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

$$\dots + \sum_{j=k}^m R_{i,j}^{-1} \cdot \Theta_{H_j} + P_i,$$

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.

В качестве объекта исследования использовался АД типа МТФ-111-6, номинальной мощностью  $P_H = 3,5$  кВт и моментом нагрузки  $M_H = 39$  Н·м.

Для оценки эффективности управляемого привода на базе АД с фазным ротором, в данном случае модифицированной системы ИР, проведено исследование ударного теплового воздействия на обмотку статора неуправляемого АД.

На рис. 4 приведены зависимости скорости нарастания температуры  $(d\Theta/dt)$  обмотки статора в момент пуска неуправляемого АД, с моментами нагрузки  $M_c = M_{сн}$ , для основного номинального режима работы АД ПВ=0,4 и  $M_c = 0,8 M_{сн}$ ,  $M_c = 1,2 M_{сн}$ ,  $M_c = 1,35 M_{сн}$  соответственно для неосновных номинальных режимов – ПВ=0,6, ПВ=0,25, ПВ=0,15.

В момент пуска скорость нарастания температуры лобовой части обмотки статора АД достигает 8 °С/сек, что обусловлено наличием ударной составляющей тока статора. Стоит отметить, что наибольшее значение скорости нарастания температуры не зависит от величины нагрузочного момента  $M_c$ , так как в период переходного процесса развиваемая скорость АД не достигает номинального значения, и развиваемый момент  $M_{em}$  на валу превышает  $M_c$ .

Использование модифицированной системы ИР АД с фазным ротором, как и любая другая система регулирования АД, обеспечивает плавность протекания переходных процессов, как в момент пуска, так и в момент торможения, что в свою очередь приводит к снижению интенсивности тепловыделения в обмотках АД.

На рис. 5 приведены результаты моделирования в виде зависимостей скорости нарастания температуры лобо-

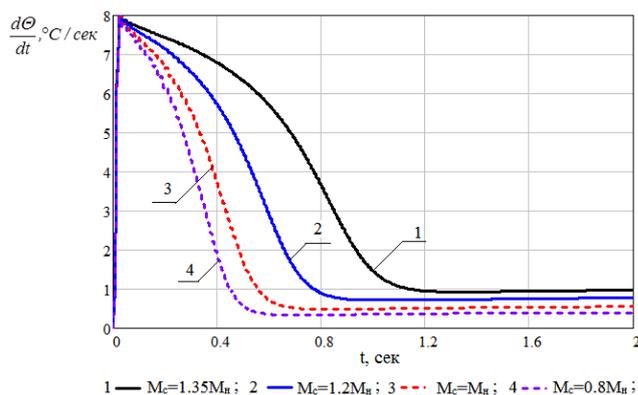


Рис. 4. Зависимость скорости нарастания температуры от продолжительности разгона до установившегося режима неуправляемого АД типа МТФ-111-6 для разных  $M_c$

вой части обмотки статора исследуемого АД от продолжительности его разгона при постоянной частоте коммутации силового ключа  $f_k = 3$  кГц, со значениями производных коэффициентов заполнения импульса  $d\gamma/dt$  равных 0,33 о.е/сек (продолжительность разгона АД составляет 3 сек.), 0,16 о.е/сек (6 сек.), 0,11 о.е/сек (9 сек.), 0,083 о.е/сек (12 сек.) соответственно для  $M_c = 1,35 M_{сн}$ ,  $M_c = 1,2 M_{сн}$ ,  $M_c = M_{сн}$ ,  $M_c = 0,8 M_{сн}$ .

Анализ полученных зависимостей показал, что минимально допустимое значение интенсивности тепловыделения обеспечивается при  $d\gamma/dt = 0,16$  о.е/сек, что соответствует продолжительности разгона АД – 6 сек. Последующее снижение  $d\gamma/dt$

не приводит к существенным изменениям в связи с невозможностью дальнейшего ограничения высших гармоник тока статора и ротора в процессе пуска АД. По сравнению с нерегулируемым АД, использование модифицированной системы ИР АД с фазным ротором обеспечивает снижение скорости нарастания температуры обмотки статора АД при  $M_c = 1,35 M_{сн}$  в 5 раз, при  $M_c = 1,2 M_{сн}$  – в 6,25 раза, при  $M_c = M_{сн}$  – в 9 раз, при  $M_c = 0,8 M_{сн}$  – в 11,8 раза.

Таким образом, для обеспечения оптимального теплового режима АД типа МТФ-111-6 с модифицированной системой ИР в условиях частых пусков, достигающих до 3000 включений в час, необходимо, чтобы продолжительность разгона превышала в 6 раз продолжительность его разгона при прямом пуске.

### ВЫВОДЫ

Исследование показало, что применение модифицированной системы импульсного регулирования АД на примере МТФ-111-6 позволит снизить скорость нарастания температуры обмотки статора до 12 раз по сравнению со скоростью нарастания температуры при его прямом пуске.

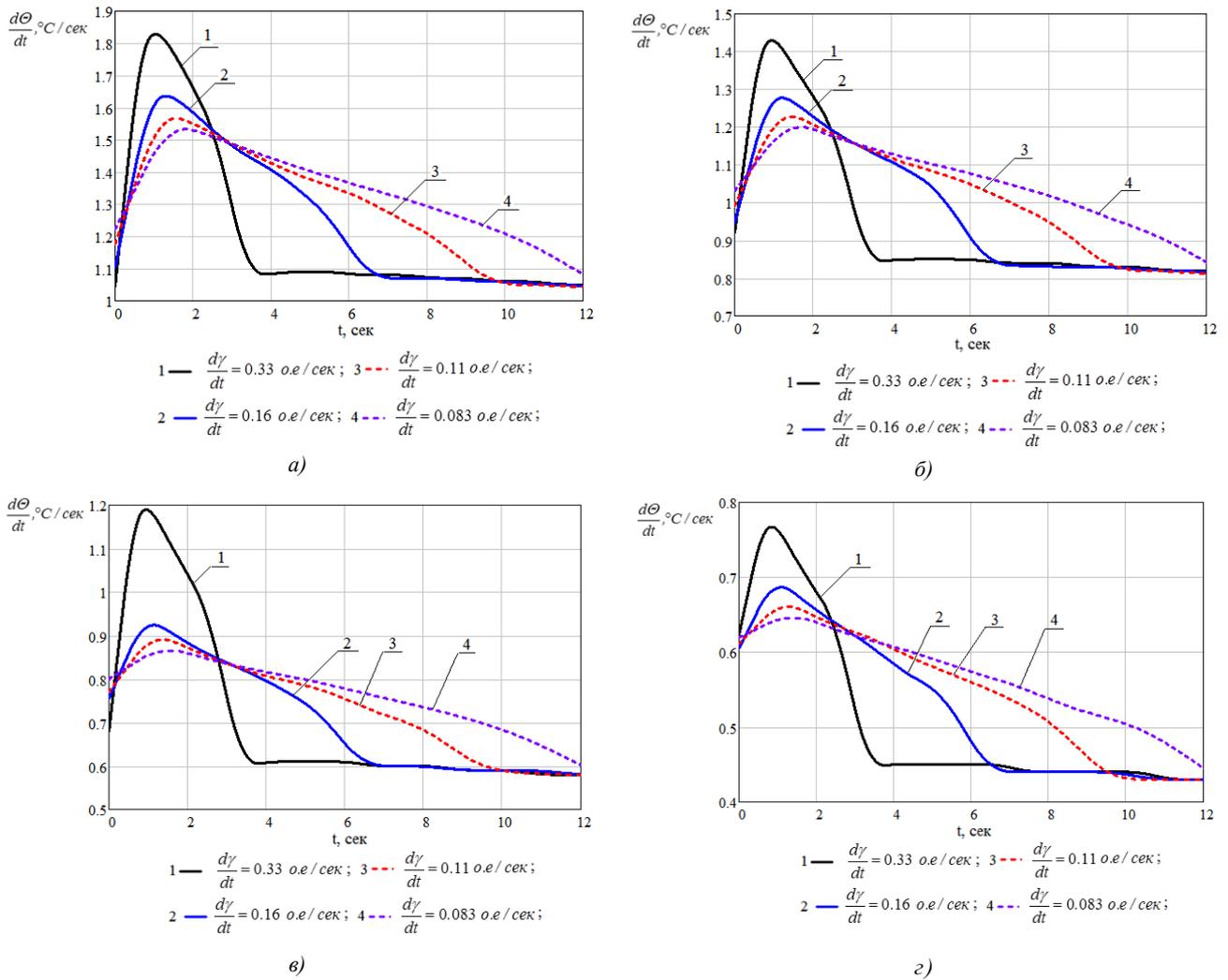


Рис. 5. Зависимости скорости нарастания температуры от продолжительности разгона до установившегося режима АД типа МТФ-111-6 с модифицированной системой ИР при разных значениях производных скважности импульса: а) при  $M_c=1,35 M_{CH}$ ; б) при  $M_c=1,2 M_{CH}$ ; в) при  $M_c=M_{CH}$ ; г) при  $M_c=0,8 M_{CH}$

Оптимальный тепловой режим для АД типа МТФ-111-6 с модифицированной системой ИР в режиме пуска обеспечивается при скорости изменения коэффициента импульса, равного 0,16 о.е./сек. При этом продолжительность разгона АД в 6 раз должна превышать продолжительность его разгона при прямом пуске.

Полученные результаты исследования могут быть использованы для оптимального проектирования систем регулирования, тепловой защиты АД с модифицированной системой ИР, предназначенного для тяжелого режима работы, где частота пусков достигает 3000 включений в час.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краново-металлургические электродвигатели [Текст] / [Н. М. Баталов, В. А. Белый, А. Б. Иоффе и др.]. – М. : Энергии, 1967. – 238 с.
2. 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.

3. 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.
4. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин [Текст] / И. П. Копылов. – М. : Высшая школа, 2001. – 327 с.
5. Bonnett Austin H. Operating temperature considerations and performance characteristics for IEEE 841 motors [Text] / Bonnett Austin H // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2011. – 37, No. 4. – P. 1120–1131.
6. Коцур М. И. Оценка ресурса системы изоляции управляемого асинхронного двигателя с фазным ротором в подсинхронном диапазоне частоты вращения

- ния ротора [Текст] / М. И. Коцур, П. Д. Андриенко, И. М. Коцур // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – №5/8(53). – С. 41–45.
7. Коцур М. И. Оценка теплового состояния изоляции асинхронного двигателя с фазным ротором с модифицированной системой импульсного регулирования [Текст] / М. И. Коцур, // Електротехніка та електроенергетика. – 2013. – №1. – С. 31–36.
8. Abreu J. P. Induction motor thermal aging caused by voltage distortion and im-balance: loss of useful life and its estimated cost [Text] / J. P. Abreu, A. E. Emanuel // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2008. – No. 1. – P. 12–20.
9. Hameyer K. Thermal computation of electrical machines [Text] / K. Hameyer, U. Pahner, R. Belmans, H. Hedia // 3rd international workshop on electric & Magnetic fields, Liège, Belgium, May 6–9, 2009, P. 61–66.

Стаття надійшла до редакції 05.11.2013.  
Після доробки 06.03.2014.

Коцур М. І.

Канд. техн. наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, Україна

**ОСОБЛИВОСТІ УДАРНОГО ТЕПЛОГО ВПЛИВУ НА АСИНХРОННИЙ ДВИГУН З СИСТЕМОЮ ІМПУЛЬСНОГО РЕГУЛЮВАННЯ В УМОВАХ ЧАСТИХ ПУСКІВ**

*Проведена порівняльна оцінка швидкості наростання температури некерованого асинхронного двигуна з фазним ротором, а також з модифікованою системою імпульсного регулювання в колі ротора в умовах частих пусків, в залежності від інтенсивності його розгону. Розроблені рекомендації щодо оптимального керування асинхронним двигуном з модифікованою системою імпульсного регулювання, які забезпечують найкращий тепловий режим при його пуску.*

**Ключові слова:** регулювання, асинхронний двигун, температура, пуск, імпульс.

Kotsur M.

Dr., Assoc. Prof., Zaporozhzhie National Technical University, Ukraine

**FEATURES OF THE OF THERMAL EFFECT IMPACT ON THE ASYNCHRONOUS MOTOR WITH THE MODIFIED PULSE CONTROL SYSTEM IN CONDITIONS OF FREQUENT STARTS**

*Currently there is no information about the optimal value of the rate of change pulse duty factor coefficient in speeding-up modes of asynchronous motor (AM) with the modified pulse control system, where the impact components of the thermal effect intensity is the lowest one.*

*The aim is to estimate the derivation of the stator temperature, the temperature of AM with the modified system in conditions of frequent starts, depending on the intensity of its speed up.*

*To estimate the derivation of the stator temperature, the temperature of AM with the modified system, depending intensity of its speed up the complex simulation model of electromagnetic and thermal process are designed. This model describes the thermal transient process in structural elements of AM and allows considering peculiarities of electromagnetic energy transformation in thermal energy, heat transferring and heat interchanging processes. The use of AM with the modified system pulse control will reduce the derivation of the stator temperature, the temperature of AM up to 12 times compared to derivation of the stator temperature, the temperature of AM at direct start. The optimal thermal conditions of AM at rate of change pulse duty factor coefficient equal to 0,16 pu/s is provided.*

*The results of research can be used to optimize the design of pulse control systems, thermal protection of AM with the modified system for heavy-duty, where the frequency of starts reaches 3000 cycles per hour.*

**Keywords:** regulation, asynchronous motor, temperature, start-up, pulse.

**REFERENCES**

1. Batalov N. M., BelAy'j V. A., Ioffe A. B. and other Kranovo-metallugricheskie ielectrodvigateli. Moscow, E'nergiya, 1967, 238 p.
2. Sipajlov G. A., Sannikov D. I., Zhadan V. A. Teplovy'e gidravlicheskie i ae'rodinamicheskie paschyoty' v e'lektricheskix mashy'nax [Text]. Moscow, Vy'ssh. Shk., 1989, 240 p.
3. 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.
4. Kopulov I. P. Matematicheskoe modelirovanie electriceskikh mashun. Moscow, Vusshaya. Shkola, 2001, 327 p.
5. Bonnett Austin H. Operating temperature considerations and performance characteristics for IEEE 841 motors [Text], *IEEE Trans. Ind. Appl*, 2011, 37, No. 4, pp. 1120–1131.
6. 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 [Text], *Eastern – European Journal of Enterprise Technologies*, 2011, №5/8(53), P. 41–45.
7. Kotsur M. I. Estimate of isolation thermal state of asynchronous motor with phase rotor at pulse control modified system [Text], *Electronics and electricity*, 2013, No. 1. P. 31–36.
8. Abreu J. P., Emanuel A. E. Induction motor thermal aging caused by voltage distortion and im-balance: loss of useful life and its estimated cost [Text], *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2008, No. 1, P. 12–20.
9. Hameyer K., Pahner U., Belmans R., Hedia H. Thermal computation of electrical machines [Text], *3rd international workshop on electric & Magnetic fields*, Liège, Belgium, May 6–9, 2009, P. 61–66.