

*к.т.н. Комаревцева Л.Н.,  
Панькова М.Ю., Худобин К.В.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗУБЦОВЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ  
НА ЭНЕРГИЮ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ АСИНХРОННОГО  
ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО В ПОВТОРНО-  
КРАТКОВРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ**

*Приведені результати теоретичних досліджень, отримані залежності, о визначають енергію теплових втрат, яка виділяється в двигуні за цикл повторно короткочасного режиму роботи з урахуванням впливу зубцевих гармонійних.*

***Ключові слова:** зубцеві гармоніки, механічна характеристика, математична модель, енергія теплових втрат.*

*Приведены результаты теоретических исследований, получены зависимости, определяющие энергию тепловых потерь, которая выделяется в двигателе за цикл повторно кратковременного режима работы с учетом влияния зубцовых гармонических.*

***Ключевые слова:** зубцовые гармоника, механическая характеристика, математическая модель, энергия тепловых потерь.*

Повышение эффективности эксплуатации угольных комбайнов может быть достигнуто за счет повышения надежности работы привода. Приводом угольного комбайна является асинхронный короткозамкнутый двигатель, который работает в повторно-кратковременном режиме, поэтому надежность двигателя зависит от величины энергии тепловых потерь, которая выделяется в его обмотках за один цикл включения. Выделяемая за один цикл включения двигателя энергия тепловых потерь определяет допустимое число пусков в час без снижения мощности двигателя и тем самым определяет производительность угольного комбайна.

Энергия тепловых потерь зависит от механической характеристики двигателя, которая определяется, в первую очередь, величиной пускового и максимального моментов. Величина пускового и максимального моментов двигателя зависит от многих факторов, некоторые из которых учитываются при проектировании двигателя (соотношение зубцов на статоре и роторе, влияние эффекта вытеснения тока, насыщения коронок зубцов и т.д.). Однако помимо основного момента в асинхрон-

ном двигателе возникают добавочные моменты от высших гармонических, которые оказывают существенное влияние на механическую характеристику [1]. Поэтому, определение механической характеристики двигателя и энергии тепловых потерь с учетом влияния высших гармонических, является вопросом актуальным.

Анализ отечественных и зарубежных исследований показывает, что наибольшее влияние на механическую характеристику двигателя оказывают зубцовые гармоники, порядок которых зависит от числа пазов статора ( $z_1$ ) и числа пар полюсов машины ( $p$ ), которые создают прямое и обратное магнитные поля в воздушном зазоре двигателя:

$$\begin{aligned} n_p &= z_1 + p, \\ o_b &= z_1 - p. \end{aligned} \tag{1}$$

В работе [1] приведена методика расчета максимального момента от зубцовых гармонических и скольжения, при котором механическая характеристика добавочного момента проходит через нуль. При этом указано, что механическая характеристика от высших гармонических подобна механической характеристике от первой гармоники, методика расчета которой приведена во всех методических пособиях по расчету асинхронных двигателей, например, [2-3].

Для расчета величины тепловых потерь в обмотках машины требуется аналитически заданная механическая характеристика с учетом влияния зубцовых гармонических. Это позволит разработать математическую модель и исследовать влияние высших гармонических на величину энергии тепловых потерь.

Объектом исследования является комбайновый асинхронный двигатель ЭКВЭ4-200, который работает в повторно – кратковременном режиме с частыми пусками (S4). Режим работы двигателя характеризуется следующими показателями: число пусков в час  $N_n = 30$ ; продолжительность включения  $ПВ = 60\%$ ,

Таким образом, длительность одного цикла составляет, с

$$t_y = \frac{3600}{30} = 120. \tag{2}$$

Время, в течение которого двигатель подключен к сети, с

$$t_{вкл} = t_{ц} \cdot \frac{ПВ}{100} = 120 \cdot 0,6 = 72. \quad (3)$$

Для анализа влияния зубцовых гармонических на энергию тепловых потерь, был выполнен электромагнитный расчет двигателя ЭКВЭ4 – 200, рассчитана механическая характеристика двигателя от первой гармоники по методике, изложенной в [2].

В таблице 1 приведена механическая характеристика двигателя от первой гармоники в относительных единицах, данные расчета активного сопротивления обмотки ротора и токов обмоток. Расчет указанных величин дан с учетом влияния эффекта вытеснения тока, насыщения коронок зубцов.

Таблица 1 – Данные расчета пусковых характеристик и активного сопротивления обмотки ротора двигателя

кольжение $s$ , о.е.	Электромагнитный момент, $M_{эм}$ , о.е.	Ток статора, $I_1$ , А	Приведенный ток ротора, $I'_2$ , А	Приведенное активное со- противление обмотки ро- тора, $r'_2$ , Ом
0	0	43,9	0	0,155
$s_H = 0,0276$	1,00	118,0	114,0	0,155
0,1	2,90	365,0	361,8	0,156
0,15	3,46	488,0	482,4	0,157
0,176	3,60	536,3	531,0	0,157
0,2	3,70	578,3	569,0	0,157
$s_m = 0,22$	$M'_m = 3,71$	607,0	594,7	0,158
0,5	3,14	805,0	775,4	0,170
0,8	2,70	878,9	839,5	0,201
1	2,40	880,3	851,4	0,220

Возникновение высших гармонических магнитной индукции в воздушном зазоре вызывается многими факторами, основными из которых являются:

- наличие пазов на статоре и роторе, что приводит к изменению величины воздушного зазора при вращении ротора;
- соотношение числа пазов на статоре и роторе  $z_1/z_2$ ;
- несимметрия воздушного зазора, вызванная прогибом вала, и т.д.

Основное влияние на механическую характеристику оказывают прямая и обратная зубцовые гармоники, порядка, соответственно:

$$\begin{aligned} n_p &= z_1 + p = 48 + 2 = 50, \\ o_b &= z_1 - p = 48 - 2 = 46. \end{aligned} \quad (4)$$

В технической литературе, например, [1] приведена методика расчета максимальных моментов механических характеристик прямой и обратной гармоник, а также величин скольжений, при которых механические характеристики проходят через нуль. По этой методике был выполнен расчет указанных величин:

$$\begin{aligned} M'_{m.np} &= 0,192, \\ M'_{m.ob} &= 0,192, \\ s_{np} &= 0,96, \\ s_{ob} &= 1,043. \end{aligned} \quad (5)$$

Для аналитического задания механических характеристик прямой и обратной гармоник применим положение [1], что механическая характеристика от зубцовых гармоник подобна механической характеристике от первой гармоники. Это дает возможность рассчитать механическую характеристику от зубцовых гармоник путем масштабирования механической характеристики от первой гармоники. Это положение и лежит в основе программы аналитического расчета механических характеристик двигателя от зубцовых гармоник, которая построена на масштабировании механической характеристики от первой гармоники.

Масштабы добавочных моментов прямого и обратного магнитных полей соответственно равны

$$\begin{aligned} m_{np} &= \frac{M'_{m.np}}{M'_m} = \frac{0,192}{3,71} = 0,0517, \\ m_{ob} &= \frac{M'_{m.ob}}{M'_m} = \frac{0,218}{3,71} = 0,0588. \end{aligned} \quad (6)$$

Величина моментов механических характеристик от прямой и обратной гармоник будут равны

$$\begin{aligned} M_{np} &= m_{np} \cdot M_{эм}, \\ M_{об} &= m_{об} \cdot M_{эм}. \end{aligned} \quad (7)$$

где  $M_{эм}$  – электромагнитный момент от первой гармоники (таблица 1).

Механические характеристики прямой и обратной гармоник смещены от нуля на величину  $s_{np} = 0,96$  и  $s_{об} = 1,043$ , соответственно. Это дает возможность задать массив скольжений для добавочных моментов через скольжение первой гармоники  $s$  следующим образом.

$$\begin{aligned} mS_{np} &= s_{np} + m_{np} \cdot s, \\ mS_{об} &= s_{об} + m_{об} \cdot s, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $s$  – массив скольжений для первой гармоники, приведенный в таблице 1.

Механическая характеристика двигателя с учетом высших гармоник представляет собой кривую, которая получается в результате сложения механических характеристик от первой и зубцовых гармонических. Для сложения кривых, заданных массивом точек, необходимо их задать аналитически.

Аналитическое задание кривых, представленных массивом точек в среде MathCAD возможно с помощью нескольких встроенных функций. К кривым представленным в таблице 1 и добавочным моментам от зубцовых гармонических применим встроенную функцию *linterp*:

$$\begin{aligned} M_{эм}(S) &= linterp(s, M_{эм}, S), \\ M_{np}(S) &= linterp(mS_{np}, M_{np}, S), \\ M_{об}(S) &= linterp(mS_{об}, M_{об}, S), \\ I_1(S) &= linterp(s, I_1, S), \\ I'_2(S) &= linterp(s, I'_2, S), \\ r'_2(S) &= linterp(s, r'_2, S). \end{aligned} \quad (9)$$

На рисунке 1 приведены кривые добавочных моментов от прямой гармоники ( $M_{np}$ ), обратной ( $M_{об}$ ) и суммарный добавочный момент ( $M_{\Sigma}$ ) зубцовых гармоник.

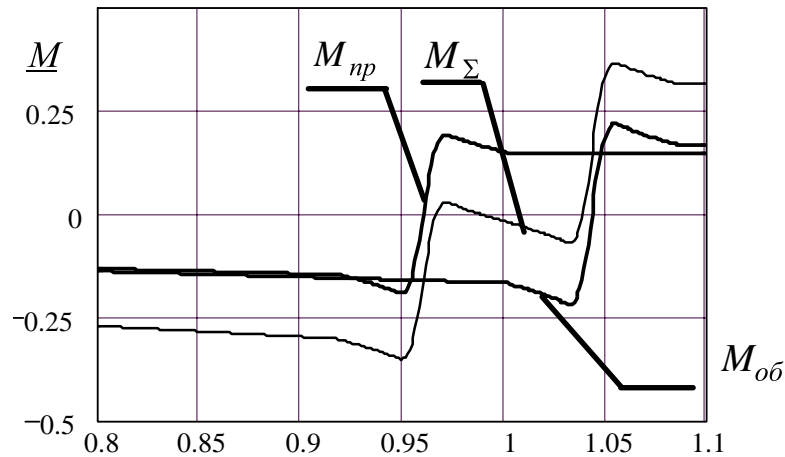


Рисунок 1 – Добавочные моменты зубцовых гармоник

На рисунке 2 приведены механические характеристики от первой гармоники ( $M_{эм}$ ) и механическая характеристика с учетом влияния зубцовых гармоник ( $M_{рез}$ ).

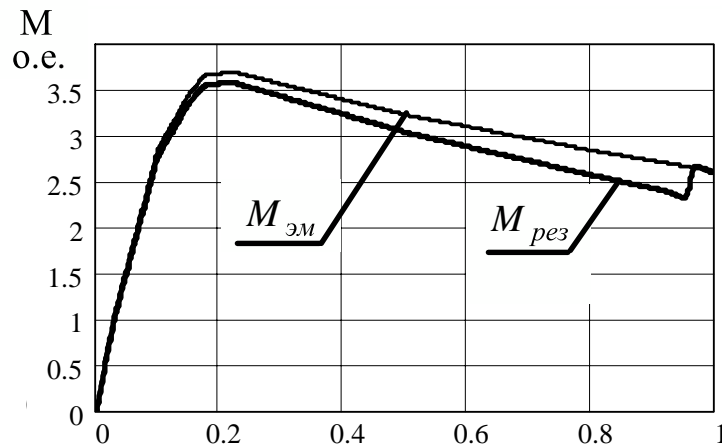


Рисунок 2 – Механические характеристики двигателя

Цель исследований состоит в определении влияния добавочных моментов от зубцовых гармоник на энергию тепловых потерь, которые выделяются в обмотках двигателя за один цикл работы привода.

Энергия тепловых потерь в обмотках может быть определена по математической модели, которая базируется на уравнениях Парка-Горева. Известные математические модели не учитывают влияние эффекта вытеснения тока и насыщения коронок зубцов на параметры машины. Учет указанных явлений приводит к тому, что математическая модель становится сложной и громоздкой. В случае, когда нет необходимости определять закон изменения тока в обмотках, возможно ис-

пользование математической модели, которая не учитывает электромагнитные переходные процессы.

Математическая модель, которая позволяет определить энергию тепловых потерь в обмотках с учетом механических переходных процессов содержит уравнение движения привода, уравнения, описывающие энергию тепловых потерь в обмотке статора и ротора. При записи уравнения движения привода учтем, что  $\frac{d\omega}{dt} = -\omega_o \frac{ds}{dt}$ . Тогда математическая модель будет иметь следующий вид

$$\begin{aligned} \frac{ds}{dt} &= -\frac{M_{эм} - M_c}{J \cdot \omega_o}, \\ \frac{dW_{эл.1}}{dt} &= m_1 \cdot I_1^2(S) \cdot r_1, \\ \frac{dW_{эл.2}}{dt} &= m_1 \cdot I_2'^2(S) \cdot r_2'. \end{aligned} \quad (10)$$

где  $M_{эм}$  – механическая характеристика двигателя;

$M_c$  – момент сопротивления на валу двигателя;

$J$  – приведенный к валу момент инерции привода;

$\omega_o = \frac{2\pi f}{p}$  – угловая частота первой гармоники;

$W_{эл1}, W_{эл2}$  – энергия тепловых потерь в обмотке статора и ротора, соответственно;

$m_1 = 3$  – число фаз обмотки статора;

$r_1 = 0,109$  – активное сопротивление фазы обмотки статора в нагретом состоянии.

Для решения системы уравнений (10) применим численный метод Рунге-Кутты с фиксированным шагом, который представлен в MathCAD функцией *rkfixed*, которая имеет следующий вид:

$$V = rkfixed(Y_0, t_0, T_c, N, D) \quad (11)$$

где  $Y_0^T = (1 \ 0 \ 0)$  – транспонированная матрица начальных условий  $s, W_{эл1}, W_{эл2}$ ;

$t_0 = 0$  – начальная точка интегрирования;

$T_c = 72$  – конечная точка интегрирования (время включенного состояния двигателя в течение цикла);

$N = 1000$  – количество шагов интегрирования;

$D$  – матрица правых частей системы уравнений (10).

Запишем матрицу  $D$  при условии, что к валу двигателя приложен номинальный момент сил сопротивления

$$D = \begin{bmatrix} \frac{M_n - M_{pez}(y_0)}{J \cdot \omega_o}, \\ m_1 \cdot I_1^2(y_0) \cdot r_1, \\ m_1 \cdot I_2^2(y_0) \cdot r_2'(y_0). \end{bmatrix} \quad (12)$$

Графики изменения энергий тепловых потерь с учетом ( $W_2$ ) и без учета ( $W_1$ ) влияния зубцовых гармоник представлены на рисунке 3.

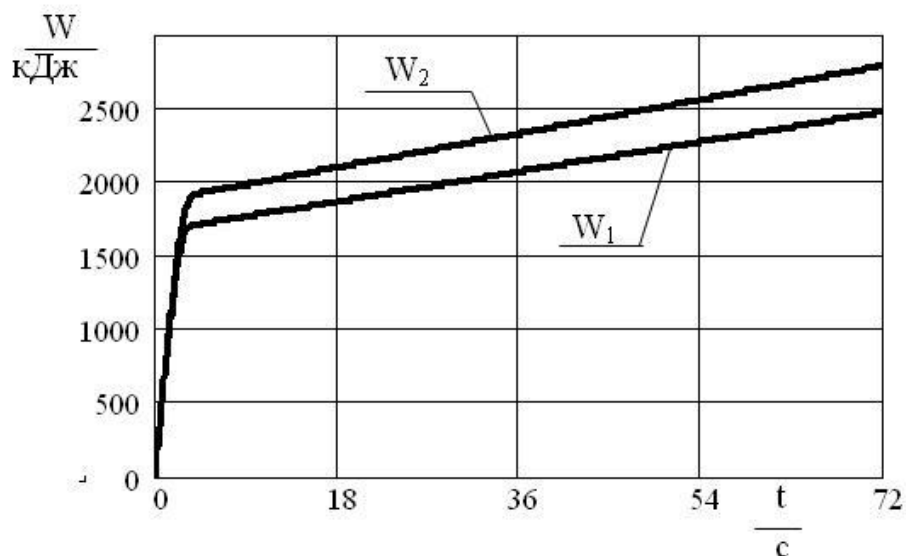


Рисунок 3 – Энергия тепловых потерь за цикл работы двигателя

Результаты расчетов показали, что за цикл будет выделяться:

- без учета зубцовых гармоник  $W_1 = 2471$  кДж;

- с учетом зубцовых гармоник  $W_2 = 2786$  кДж.

Таким образом, зубцовые гармонические увеличивают энергию тепловых потерь за один цикл включения двигателя на 13 %.



Энергия тепловых потерь, которая выделяется в обмотках за один цикл, определяет допустимое число пусков двигателя в час. Полученные результаты показывают, что зубцовые гармоники оказывают существенное влияние на величину энергии тепловых потерь, и их необходимо учитывать при определении допустимого числа пусков двигателя.

**Выводы.** Разработанная программа аналитического задания механической характеристики двигателя, позволяет составлять математические модели системы с учетом добавочных моментов от зубцовых гармонических, которые возникают в воздушном зазоре двигателя из-за наличия пазов на статоре и роторе. Исследования показали, что добавочные моменты от зубцовых гармоник оказывают достаточно большое влияние на величину электрических потерь в обмотках двигателя, работающего в повторно-кратковременном режиме работы, что говорит о необходимости их учета при проектировании двигателей работающих в повторно-кратковременном режиме с частыми пусками.

#### **Библиографический список**

1. Геллер Б., Гамата В. *Высшие гармоники в асинхронных машинах/ Пер. с англ. Под. Ред. З.Г. Каганова.* – М.: «Энергия», 1981. – 352 с., ил.

2. *Проектирование электрических машин: Учеб. Пособие для вузов/И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков и др.; Под ред. И.П. Копылова.* – М.: Энергия, 1980. – 496 с., ил.

3. Загрядцкий В.И., Ландкоф Л.Б., Савин Б.В., Яковенко, В.А. Бурковский А.Н. *«Комбайновые двигатели»,* издательство «Штиинца», 1986. – 133 с., ил.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. Заблодским Н.Н.*