

*к. т. н., доц. Заблодский Н.Н.,
аспирант Филатов М.А.,
ст. преподаватель Смагина И.А.,
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

*к. т. н. Захарченко П.И.,
инженер Гринь Г.М.
(ОАО «Первомайский электромеханический
завод им. К.Маркса», г. Первомайск, Украина)*

ДИНАМИКА И ГАРМОНИЧЕСКИЙ СОСТАВ ТОКОВ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Наведені результати експериментальних досліджень динаміки та гармонічного складу струмів поліфункціональних електротепломеханічних перетворювачів технологічного призначення.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Полифункциональные электротепломеханические преобразователи (ЭТМП) технологического назначения – новый класс электромеханических систем [1], отличающийся от традиционных асинхронных машин структурной, функциональной и тепловой интеграцией. Указанные особенности определяют необходимость в усовершенствовании методов исследований энергетических, тепломассообменных и механических процессов, происходящих в ЭТМП.

Анализ исследований и публикаций. Известные результаты исследований динамических режимов и математические модели асинхронных машин не могут в полной мере быть использованы для описания динамических режимов ЭТМП, поскольку в большинстве случаев не учитывается связь тепловых и электромагнитных полей во внутренней структуре ЭТМП, а также взаимодействие последнего с нагрузочно – охлаждающей средой [2,3]. Ряд математических моделей, предложенных для описания процессов в асинхронных двигателях с массивным ротором [4,5], а также математические модели шнековых [6] и погружных ЭТМП [7] значительно приблизили описание динамики процессов в ЭТМП к реально происходящим. При этом были приняты следующие допущения: независимость процессов, происходящих в отдельных модулях; принятие в расчет момента инерции только того участка массивного ротора, который связан с конкретной длиной

статора двигателя (ДМ) и тормозного (ТМ) модуля; отсутствие взаимного влияния по цепям питающего напряжения для бистаторного исполнения ЭТМП; учет изменений коэффициентов затухания электромагнитных и электромеханических процессов от температуры. Погрешность от введения таких допущений может быть определена только экспериментальным путем. Наконец, динамика процессов в ЭТМП, безусловно, формируется взаимным воздействием ДМ и ТМ через общий массивный ротор – вал. В качестве интегральной характеристики, отражающей переходные процессы, может быть принят ток отдельных модулей и общий ток ЭТМП.

Постановка задачи. Целью данной работы является экспериментальное исследование на натуральных образцах динамики и гармонического состава токов ЭТМП для установления особенностей переходных процессов и адекватности математических моделей.

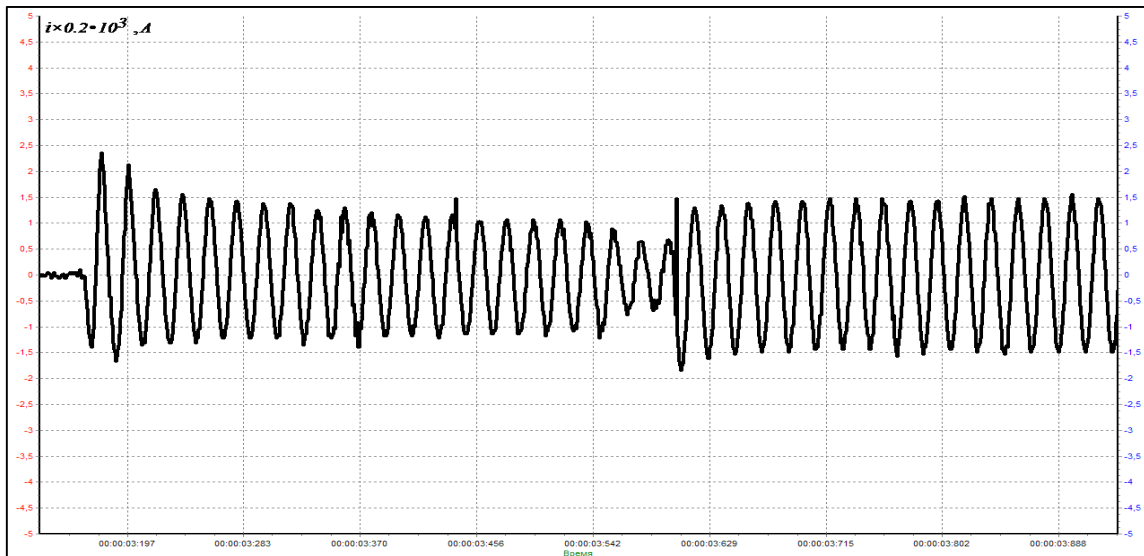
Изложение материала и его результаты. В [8] изложена структура и принцип работы системы импульсного управления реверсом и форсировкой ЭТМП технологического назначения, формирующей процесс форсированного пуска в три этапа:

- одновременное, согласное (по вращающему моменту) включение ДМ и ТМ с последующим разгоном ротора до определенной скорости;
- реверсирование ТМ и перевод его в режим противовключения;
- одновременная работа двух модулей с низкой частотой вращения ротора и выход на установившийся режим.

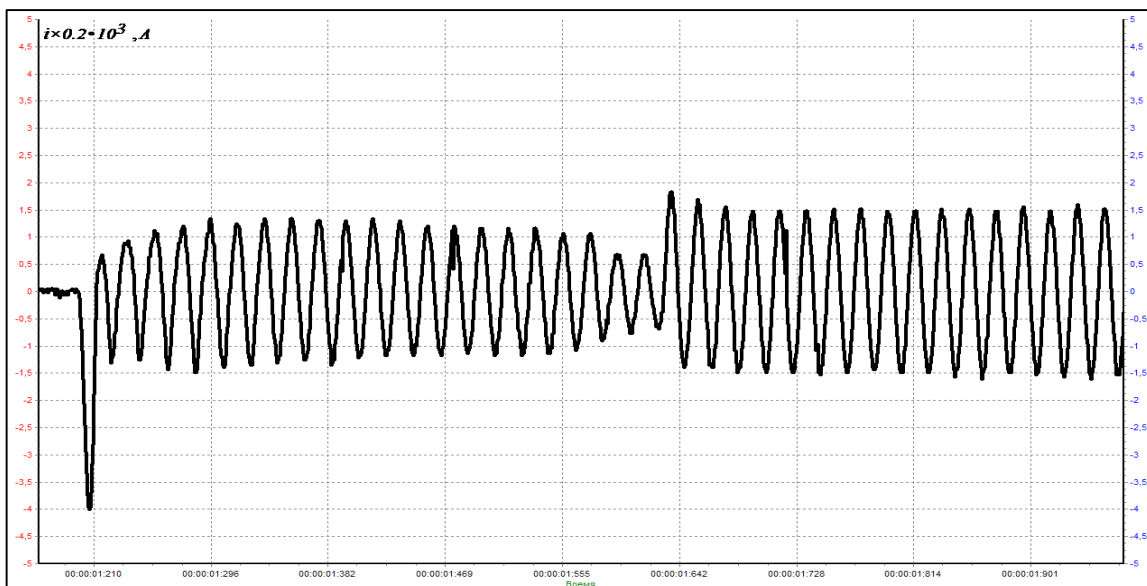
Для регистрации переходных процессов электрических величин и частоты вращения использован USB – осциллограф на базе микроконтроллера C8051F321 с поддержкой высокоскоростного канала обмена данными (USB) с компьютером и не требующий дополнительных источников питания. Применялись режимы работы осциллографа, спектроанализатора и самописца. В последнем случае сигнал непрерывно в реальном масштабе времени считывался с микроконтроллера. Разрядность АЦП – 10 бит, входное напряжение - 20...+20 В, частота дискретизации – 0,01 Гц...200 кГц. Результаты измерения копировались в виде растрового рисунка формата *.bmp (Windows Bitmap) в буфер обмена Windows для последующей обработки. Ток вход осциллографа подключался к датчику тока, выполненному на базе трансформатора тока с калиброванным нагрузочным сопротивлением. В качестве датчика напряжения был использован трансформатор напряжения.

На рис.1 (а, б) представлены осциллограммы общего тока ЭТМП для двух вариантов пуска на холостом ходу: при начальном значении

скорости вращения ротора $\omega_{po} = 0$ и при вращающемся роторе $\omega_{po} = 25$ рад/с.



а)



б)

Рисунок 1 – Осциллограммы пуска электротепломеханического преобразователя энергии при различных начальных скоростях вращения

а) $\omega_{po} = 0$;

б) $\omega_{po} = 25$ рад/с.

На осциллограммах каждому из указанных выше этапов пуска соответствует своя временная зона и характер изменения тока. Полная аналогия наблюдается лишь по второму этапу (процесс реверса ТМ). Характерно, что процесс отключения ТМ на этом этапе не сопровождается броском тока – уменьшается лишь амплитуда общего тока, поскольку питающее напряжение поступает только на ДМ. Основное отличие в характере переходного процесса наблюдается на первом этапе (однонаправленные электромагнитные моменты ДМ и ТМ). При пуске ЭТМП из состояния покоя мы наблюдаем типичный для асинхронных машин переходный процесс: начальный бросок (ударный ток) и апериодический процесс снижения амплитуды тока практически до квазиустановившегося значения. Длительность процесса, определяемая малой электромагнитной постоянной, составляет не более 0,4 с. Повторный пуск ЭТМП при вращающемся роторе с незатухшим магнитным полем сопровождается большим в 1,7 раза ударным током и совершенно иным характером переходного процесса: амплитуда тока в течение 0,08 с нарастает, а затем уменьшается с такой же закономерностью, как в осциллограмме а). Третий этап в осциллограммах различается небольшим превышением амплитуд тока в осциллограмме б).

На рис. 2 показана осциллограмма общего потребляемого тока и начальные сигналы датчика движения ротора при пуске ЭТМП с $\omega_{po} = 0$. Угловая скорость ротора в пределах одного (первого) оборота ротора составляет 24,8 рад/с, при этом электромагнитный процесс практически затухает в пределах этого оборота.

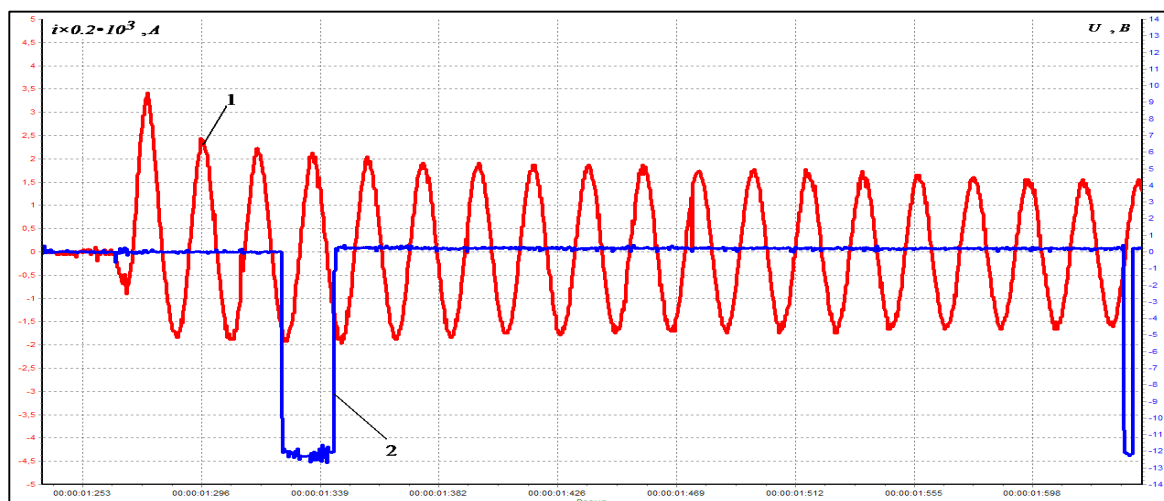


Рисунок 2 – Осциллограмма пуска ЭТМП
1- кривая общего тока; 2 - импульсы датчика движения.

Как видим, вращение ротора и наличие незатухшего поля в момент пуска ЭТМП формирует заметную величину противо ЭДС в обмотке статора и снижает значение потребляемого тока. Необходимо учитывать ещё одну закономерность, установленную ранее в [9]: первая полуволна электромагнитного момента при пуске асинхронного двигателя с вращающимся ротором (на скорости более половины синхронной) имеет отрицательный знак, что и является причиной ударного значения тока, некоторого замедления ротора, сопровождающегося увеличением амплитуды тока.

Скольжение, при котором работает ТМ на третьем участке пуска, составляет $(2-s_d)$, где s_d – скольжение ДМ. Поскольку частота вращения ротора при запуске с вращающимся ротором к моменту наступления третьего этапа значительно больше, чем в случае пуска с неподвижным ротором, то значение тока ТМ и тормозного момента им создаваемого несколько выше. В итоге результирующий момент при фактически закончившемся электромагнитном переходном процессе определяется только электромеханическими и тепловыми процессами:

$$M_{pi} = M_{Di} + M_{Ti} = \left[(i'_{2d})^2 \cdot \frac{R'_{2d}}{s_d} - (i'_{2t})^2 \cdot \frac{R'_{2t}}{(2-s_d)} \right] \cdot \frac{m \cdot p}{\omega_i}, \quad (1)$$

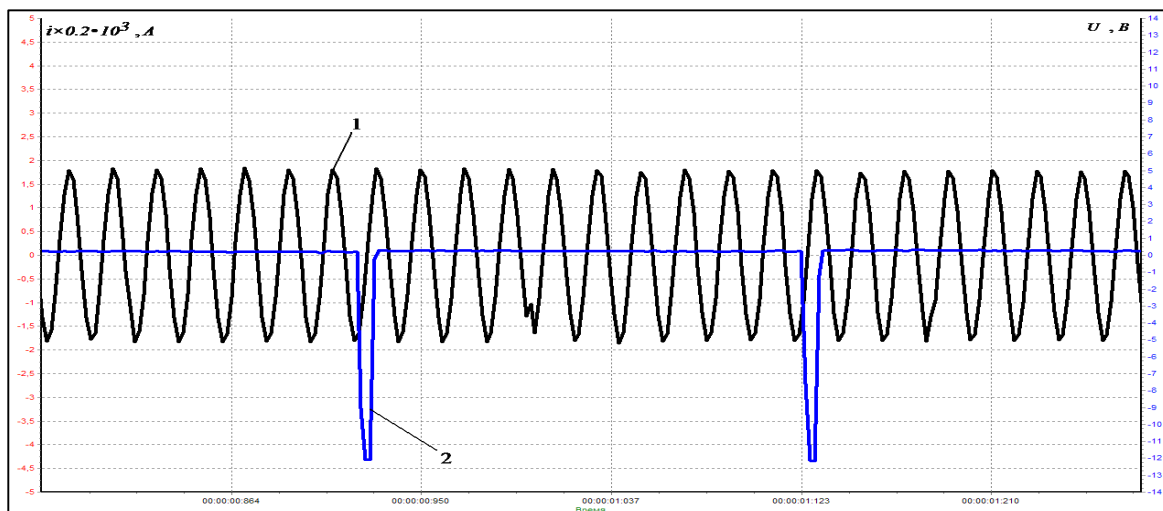
где i'_{2d} , i'_{2t} , R'_{2d} , R'_{2t} , R'_{2d} , ω_i – текущие значения приведенного тока и активного сопротивления ротора соответственно ДМ и ТМ, а также значение угловой скорости поля ротора;

M_{Di} , M_{Ti} – текущие значения электромагнитных моментов ДМ и ТМ;

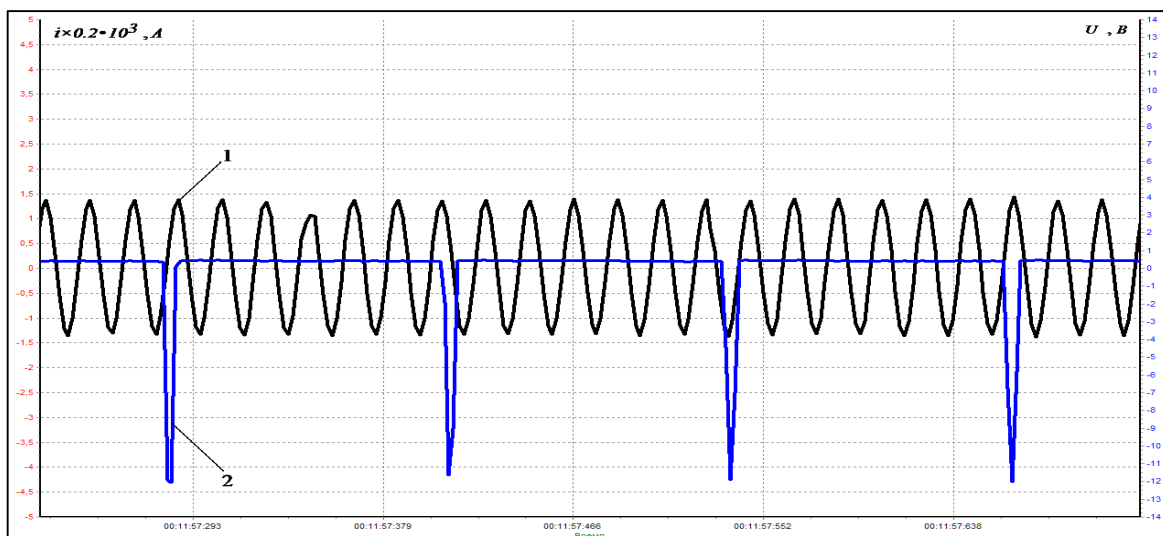
m , p – соответственно число фаз и число пар полюсов в модулях ЭТМП. В общем случае ДМ и ТМ могут иметь разные значения m и p .

Переходный процесс изменения тока формируется не только электромагнитными и электромеханическими процессами, происходящими в ЭТМП в период пуска или воздействия резкопеременных нагрузок, но и температурными воздействиями на статор и массив ротора. Необходимо отметить, что диапазон изменения температуры ротора может составлять $(20...350)^\circ\text{C}$, что существенно меняет величины электромагнитных параметров ЭТМП. На рис. 3 и рис. 4 показаны фрагменты осциллограмм токов и частоты вращения (импульс с амплитудой 12 В соответствует одному обороту ротора), снятых в период времени непосредственно после пуска и по истечении примерно 12 мин работы ЭТМП на холостом ходу. Сравнительный анализ изменения величины за этот промежуток времени дал следующие результаты:

- изменение частоты вращения (увеличение) в 1,5 раза;
- изменение амплитуды тока ТМ (снижение) в 1,07 раза;
- изменение амплитуды тока ДМ (снижение) в 1,25 раза;
- изменение амплитуды общего тока ЭТМП (снижение) в 1,34 раза.



а)



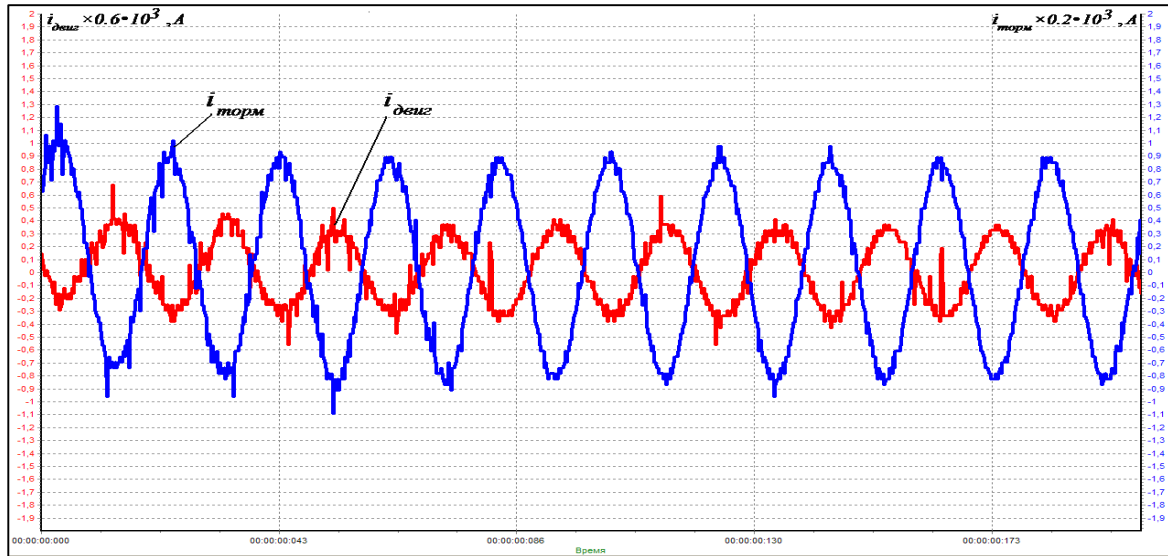
б)

1 – кривая тока; 2 – импульс датчика движения.

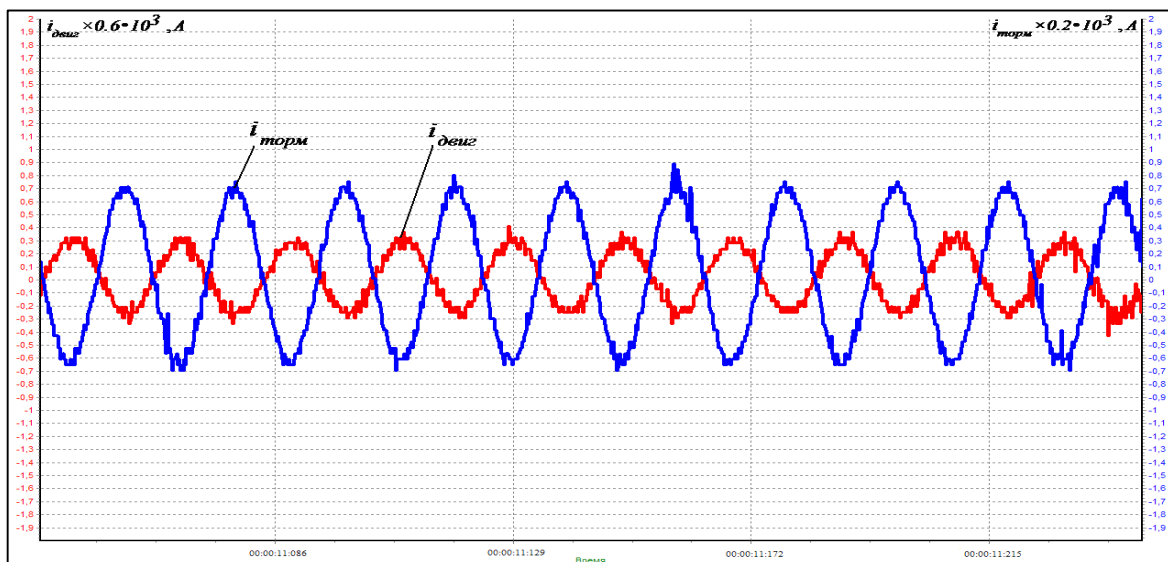
Рисунок 3 – Осциллограммы изменения общего тока и скорости вращения

а) в начальный момент после пуска;

б) по истечению 12 мин.



а)



б)

$i_{\text{торм}}$ – кривая тока ТМ; $i_{\text{двиг}}$ – кривая тока ДМ.

Рисунок 4 – Осциллограммы изменения токов отдельных модулей
 а) в начальный момент после пуска;
 б) по истечению 12 мин.

Достаточно сложная зависимость (1) результирующего момента от приведенного вторичного тока, скольжения и активного сопротивления ротора, как видим, отражается в полученных экспериментальных осциллограммах как свойство саморегулируемости

ЭТМП при температурных воздействиях: увеличение частоты вращения, вызванное повышением результирующего момента, происходит как своеобразная компенсация температурного снижения токов в ДМ и ТМ.

По результатам экспериментальных исследований установлены также отклонения от расчетных значений величин и параметров, полученных по обобщенной математической модели [6], максимальное значение которых не превышает 9,5%.

Магнитное поле в воздушном зазоре ЭТМП в соответствии с методом гармонических проводимостей для системы координат, закрепленной на статоре, может быть представлена выражением:

$$b_1(x_1, t) = \sum_{k_1=0}^{k_1=\infty} \sum_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} B_{\lambda} \cdot \cos\left(k_1 \cdot \omega_1 \cdot t - \lambda \cdot \pi \cdot \frac{x_1}{\tau_1} - \gamma_{\lambda}\right), \quad (2)$$

где $b_1(x_1, t)$ - мгновенное значение магнитной индукции в точке с координатой x_1 вдоль воздушного зазора, расположенной на внешней (внутренней) поверхности статора модуля ДМ либо ТМ;

B_{λ} - амплитудное значение гармоники;

ω_1, τ_1 - угловая частота и полюсное деление основной гармоники соответственно;

γ_{λ} - начальный фазовый угол гармоники;

k_1, λ - числа, определяющие порядок соответственно временных и пространственных гармоник магнитной индукции.

При этом значения чисел k_1 и λ находим в соответствии с выражениями:

$$k_1 = 1 + j + \frac{i_D}{p} \cdot (1 - s_1); \quad (3)$$

$$\lambda = v_1 + \alpha \frac{z_1}{p} + j + \frac{i_c}{p} + \frac{i_d}{p} + \frac{2}{p} \frac{i_t}{p}; \quad (4)$$

где $v_1 = (6 \cdot k_1 + p)$ - порядок гармоник МДС обмотки статора;

$k_1 = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$;

p - число пар полюсов ДМ (ТМ);

z_1 - число пазов статора ДМ (ТМ);

s_1 - скольжение ротора по отношению к основной гармонике;

$\lambda, j, i_c, i_d, i_t$ - целые числа, включая ноль, определяющие порядок гармоник, вызванных наличием пазов на статоре (λ), насыщением магнитной цепи (j), статическим (i_c) и динамическим (i_d) эксцентриситетом, а также температурными колебаниями удельного сопротивления ρ и относительной магнитной проводимости μ участков ротора за один оборот его вращения (i_t).

Рассмотрим некоторые особенности формирования высших гармоник в ЭТМП.

Динамический эксцентриситет возникает при моментной неуравновешенности ротора-шнека (главная ось инерции пересекает ось вращения в центре масс) или динамической неуравновешенности при наличии одновременно статической и моментной неуравновешенности (главная ось инерции и ось вращения пересекаются не в центре масс или перекрещиваются). При этом формируются возмущающие силы и моменты, вызывающие вращательные колебания ротора относительно поперечной оси, проходящей через центр масс и в любой осевой плоскости.

Изменение тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля по направлению в глубь ротора (координата y) происходит по экспоненциальному закону:

$$\dot{H}_x = \dot{H}_{x0} \cdot \exp[-(1+j) \cdot \alpha \cdot y], \quad (5)$$

где \dot{H}_{x0} - напряженность поля на внутренней поверхности ротора;

$\alpha = \frac{1}{\Delta}$ - величина, обратная глубине проникновения при допущении постоянства магнитной проницаемости.

Однако относительная магнитная проницаемость является функцией напряженности поля:

$$\mu' = \frac{K_2}{h \left(1 - \frac{1}{n}\right)} \cdot \left(1 - e^{-\alpha_2 \cdot H \cdot m}\right) + \mu'_H, \quad (6)$$

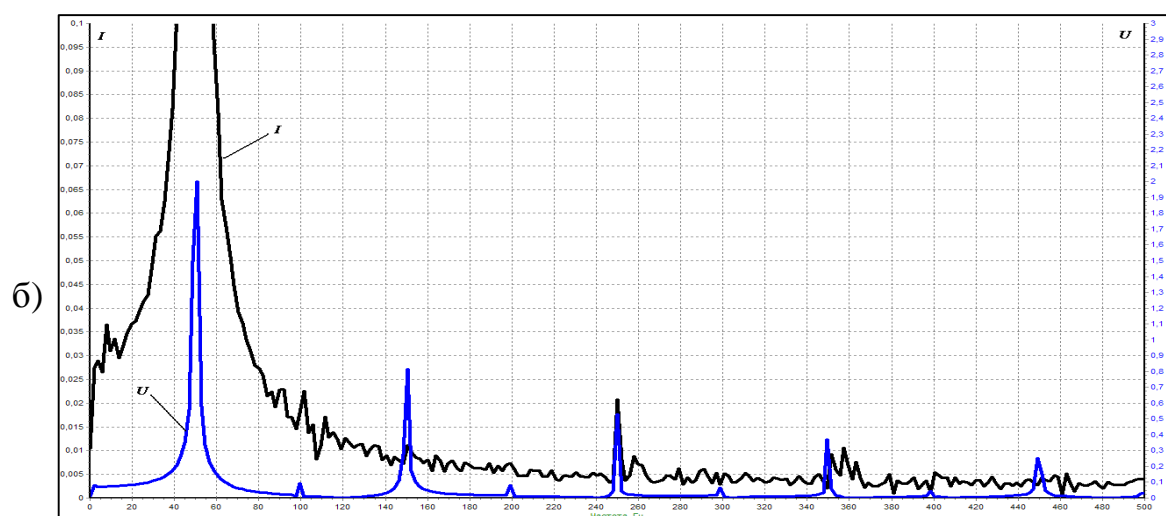
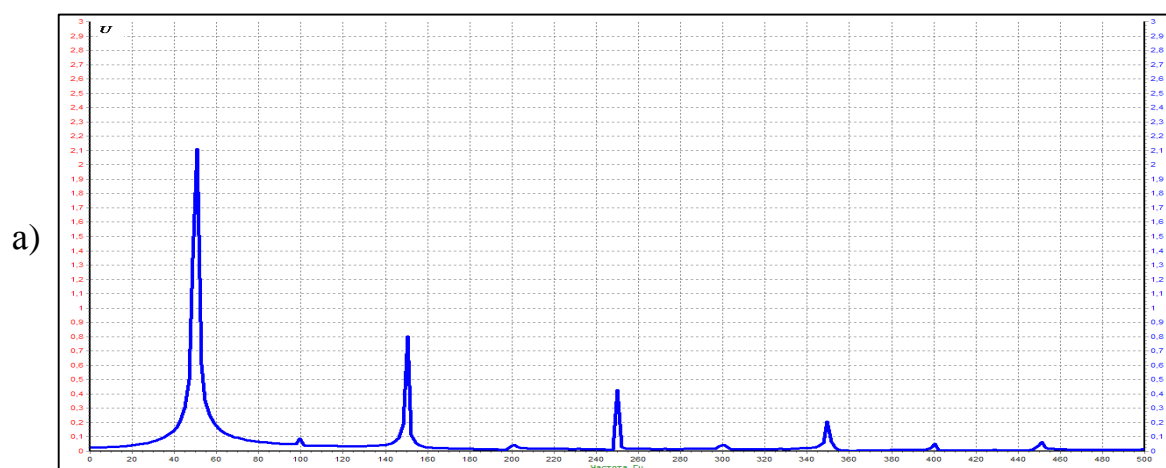
где h - показатель, зависящий от вида кривой $\mu' = f(H)$ для данного сорта материала и изменяющийся в пределах 10...20;

K_2, m, α_2 - постоянные, определяемые по кривой намагничивания;

μ'_H - относительная магнитная проницаемость при $H \rightarrow 0$.

В области малых индукций и напряженности ($H < 20 \cdot 10^3$ А/м) кривая относительной магнитной проницаемости имеет резко нелинейный характер. Для шнекового ЭТМП такие области располагаются ближе к внешней поверхности ротора, где производная магнитной проницаемости в слое $\frac{d\mu}{dH}$ может резко изменять знак при колебаниях тока в слое. Последний, как уже отмечалось ранее, изменяется при циклических изменениях температуры охлаждения ротора.

На рис. 5 (а, б, в) представлены спектрограммы питающего напряжения и потребляемого тока ЭТМП. Из сравнения спектрограмм а) и б) следует, что подключение ЭТМП к сети сопровождается усилением амплитуды нечетных гармоник напряжения, кроме первой и третьей, и тем в большей степени, чем выше порядок гармоники. Например, усиление девятой гармоники напряжения при включении ЭТМП достигает четырехкратного значения.



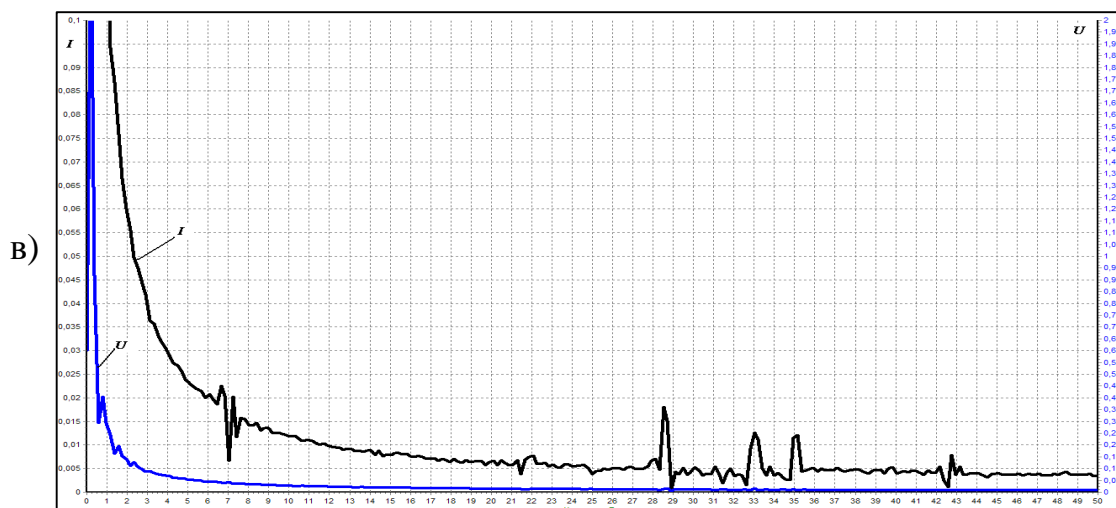


Рисунок 5 – Спектрограммы питающего напряжения и потребляемого тока ЭТМП

Анализируя спектрограммы токов (рис. 5 б, в) можно отметить, что высшие гармоники в диапазоне частот (0...500 Гц) менее выражены, чем в спектрограммах напряжений, однако все же более ярко проявились на частотах 101 Гц; 105 Гц; 145 Гц; 245 Гц; 375 Гц. В диапазоне от 1 до 50 кГц в спектрограммах токов проявляются гармоники следующих частот: 1 кГц; 7 кГц; 15 кГц; 17 кГц; 28,5 кГц; 33 кГц; 35 кГц; 43 кГц. Указанные выше гармоники относятся к разряду четных.

Как показали измерения ЭДС датчика Холла (ДХ), расположенного на статоре, спектр гармоник содержит в основном временные гармоники, обусловленные насыщением магнитной цепи модуля и динамическим эксцентриситетом. В этом спектре имеются также составляющие с частотами питающего напряжения. Однако возможность выделения гармоник, вызванных зубчатостью статора, температурными колебаниями в структуре ротора, статическим эксцентриситетом появляется при размещении ДХ на внутренней поверхности ротора ЭТМП.

Получение дополнительной возможности разделения прямых и обратных статорных гармоник можно организовать при питании обмотки статора постоянным током, значение которого эквивалентно значению трехфазного переменного тока. Ротор шнекового ЭТМП при этом вращается с помощью стороннего внешнего статора.

Для точного определения порядка и амплитуды гармоник ДХ как на роторе, так и на статоре, были использованы мультипликативные

свойства преобразователя Холла. Датчик Холла при этом питается синусоидальным управляющим током регулируемой частоты $k \cdot \omega$, а выходные сигналы с холловских выводов фиксируются с помощью USB- осциллографа.

Мгновенные значения анализируемой магнитной индукции $b(t)$ определяются выражением (2). С помощью генератора синусоидальных напряжений на управляющие входы ДХ подается напряжение:

$$u(t) = U_m \cdot \sin(k \cdot \omega \cdot t + \alpha_k), \quad (7)$$

где α_k - угол сдвига фаз между $u(t)$ и анализируемой функцией.

На холловских контактах получаем напряжение:

$$u_2 = K \cdot b(t) \cdot u(t), \quad (8)$$

где K – коэффициент пропорциональности.

Поскольку средние значения всех гармонических составляющих, за исключением K - й, за период равны нулю, то среднее значение напряжения Холла определится из выражения:

$$u_{2cp} = K \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_0^{2 \cdot \pi} b(t) \cdot u(t) dt = K \cdot \frac{u_k \cdot B_m}{2} \cdot \cos(\varphi_k - \alpha_k), \quad (9)$$

Из выражения (9) определяем амплитуду и фазу K – й гармоники.

Выводы и направление дальнейших исследований.

1. Предложена аппаратная реализация способа исследования переходных и квазиустановившихся процессов бистаторного ЭТМП технологического назначения. Установлен характер переходного процесса изменения тока в период пуска ЭТМП при различных начальных значениях скорости массивного ротора.

2. Установлено, что переходный процесс изменения интегральной величины – потребляемого тока ЭТМП определяется не только электромагнитными и электромеханическими процессами, но и тепловыми изменениями электромагнитных параметров ЭТМП.

3. Предложены аналитические зависимости расчета результирующего электромагнитного момента и мгновенных значений магнитной индукции в воздушном зазоре ЭТМП.

4. Экспериментально зарегистрирован спектр высших гармоник питающего напряжения и потребляемого тока ЭТМП. Предложены

способы разделения гармоник в соответствии с формирующими их причинами.

5. Для полного анализа спектра высших гармоник необходимо провести более детальные исследования с записью дополнительных экспериментальных данных, которые могут быть получены с датчиков Холла при размещении их на подвижных и неподвижных частях ЭТМП.

Приведены результаты экспериментальных исследований динамики и гармонического состава токов полифункциональных электротепломеханических преобразователей технологического назначения.

The results of experimental researches of dynamics and harmonic composition of currents of polyfunctional electric-warmly-mechanical transformers of the technological setting.

Библиографический список.

1. Шинкаренко В.Ф., Заблодский Н.Н. Генетическое моделирование и структура генома электромеханических преобразователей энергии технологического назначения // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – Харьков: Технолог. центр, 2004. - №2 (8). –С. 44-51.

2. Трещев И.И. *Электромеханические процессы в машинах переменного тока.*- Л.: Энергия, Ленинград. отд-ние, 1980. – 314с.

3. Копылов И.П. *Математическое моделирование электрических машин: Учебник для вузов.* – М.: Высш.шк., 1987. – 248 с.

4. Вербовой А.П., Вербовой П.Ф., Съянов А.М. *Электромагнитные параметры асинхронных двигателей с массивными ферромагнитными роторами // Регулируемые асинхронные двигатели.* – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины. – 1996. – С. 55 – 56.

5. Съянов А.М. *Расчет характеристик асинхронного двигателя с массивным ферромагнитным ротором методом конечных элементов // Регулируемые асинхронные двигатели.* – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины. – 1998. – С. 20 – 29.

6. Васьковский Ю.Н., Заблодский Н.Н. *Моделирование полей и характеристик электротепломеханических преобразователей технологического назначения // Техн. электродинаміка.* – К.: Ін-т електродинаміки НАН України Тем. вип. «Проблеми сучасної електротехніки»,- 2006, част.7.- С. 41-44.

7. Заблодский Н.Н. *Моделирование динамических режимов и*

теплообменных процессов электротепломеханических преобразователей // Техн. електродинаміка. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України Тем. вип. «Проблеми сучасної електротехніки»,- 2004, част.б.- С. 34-37.

8. Заблодский Н.Н., Коцемир И.А., Стройников В.Г. Система импульсного управления реверсирования и форсировки электротепломеханических преобразователей энергии технологического назначения // Сб. науч. тр. Донбасского госуд. техн. ун-та. Вып. 23 – Алчевск: ДонГТУ, 2007. – С. 323 – 328.

9. Петров Л.П., Чан Ван Тхинь. Динамика магнитных потоков асинхронного электропривода // Электричество. -1991. -№12. – С. 40 – 48.

*Рекомендовано к печати
д. т. н., проф. Зеленовым А.Б.*