

## ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Заблодский Н.Н., к.т.н., доц., Филатов М.А., Квасов В.А.

Донбасский государственный технический университет

Украина, 94204, Луганская обл., г. Алчевск, пр. Ленина 16, ДонГТУ, каф. "Электрические машины и аппараты"  
тел. (06442) 2-05-64, факс (06442) 2-68-87, E-mail: info@dmmti.edu.ua

Гринь Г.М.

ОАО "Первомайский электромеханический завод им. К. Маркса"

Украина, 93202, Луганская обл., г. Первомайск-2, пер Заводской, 1  
тел. (06455) 6-10-15, факс (06455) 6-30-32

*Наведені результати експериментальних досліджень перехідних процесів поліфункціональних електротепломеханічних перетворювачів технологічного призначення.*

*Приведены результаты экспериментальных исследований переходных процессов полифункциональных электротепломеханических преобразователей технологического назначения.*

### ВВЕДЕНИЕ

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. 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 двигательного (ДМ) и тормозного (ТМ) модуля; отсутствие взаимного влияния по цепям питающего напряжения для бистаторного исполнения ЭТМП; неучет 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.

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

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭТМП И ИХ АНАЛИЗ

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. Токосный вход осциллографа подключался к датчику тока, выполненному на базе трансформатора тока с калиброванным нагрузочным сопротивлением. В качестве датчика напряжения был использован трансформатор напряжения. Экспериментальные исследования проводились на промышленных образцах шнекового ЭТМП в условиях ООО "Кондратьевская ЦОФ".

На рис. 1 (а, б) представлены осциллограммы общего тока ЭТМП для двух вариантов пуска на холостом ходу: при начальном значении скорости вращения ротора  $\omega_{p0} = 0$  и при вращающемся роторе  $\omega_{p0} = 25$  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 аperiodический 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).

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. Последующая (вторая) полуволна тока в 3 раза меньше, чем в осциллограмме а), поскольку ротор, имея ненулевую стартовую скорость, затрачивает уже значительно меньшее значение потребляемой мощности для разгона ротора (запасания кинетической энергии) и создания магнитного поля на стадии электромагнитных пере-

ходных процессов. В результате мы наблюдаем сложный аperiodический процесс изменения суммарного мгновенного значения тока ЭТМП.

Приближенное выражение для мгновенного значения суммарного тока, потребляемого ЭТМП, при питании  $N$  модулей от одного источника напряжения может быть предоставлено в виде:

$$i_{\Sigma} = \sum_{k=1}^{k=N} I_{1yk} \cdot \cos(\omega_{1k} \cdot t - \varphi_{1k}) - \sum_{k=1}^{k=N} \frac{U}{X'_{1k}} \cdot e^{-\alpha'_{1k} \cdot t} + \sum_{k=1}^{k=N} \left[ \frac{U}{X'_{1k}} - I_{1yk} \cdot \cos(\varphi_{1k}) \right] \cdot e^{-\alpha'_{1k} \cdot t} \cdot \cos(\omega_p \cdot t), \quad (1)$$

где  $I_{1yk}$  – амплитуда установившегося (вынужденного) тока  $k$ -го модуля;  $\alpha'_{1k}$ ,  $\alpha'_{2k}$  – параметры переходного процесса.

При этом:

$$\alpha'_{1k} = R_{1k} / X'_{1k}, \quad \alpha'_{2k} = R'_{2k} / X'_{2k}, \\ X_{1k} = X_{mk} + X_{1\sigma k}, \quad X_{2k} = X_{mk} + X_{2\sigma k}, \\ X'_{1k} = X_{1k} \cdot \sigma_k, \quad \sigma_k = 1 - \frac{X_{mk}^2}{X_{1k}^2},$$

где  $X_{1\sigma k}$ ,  $X_{2\sigma k}$  – параметры рассеяния обмоток статора и ротора  $k$ -го модуля;  $X_{mk}$  – параметр взаимной индукции.

Первый член правой части выражения (1) представляет собой вынужденную (составляющую суммарного тока), а второй и третий – аperiodическую (свободную) составляющую, учитывающую электромагнитные и электромеханические переходные процессы.

Для оценки параметров аperiodической составляющей переходного тока может быть использован интегральный метод оценки [10]. Переходный ток (1) не является периодической функцией и его разложение в ряд Фурье дает постоянную составляющую  $A_0$ , высшие гармоники и 1-ю гармонику тока, параметры которой отличаются от параметров вынужденной синусоидальной составляющей переходного тока из-за вклада, который дает аperiodическая составляющая тока. Постоянная составляющая ряда Фурье представляется в виде:

$$A_0 = I_{a0} \cdot \frac{\tau}{T} \cdot (1 - e^{-T/\tau}), \quad (2)$$

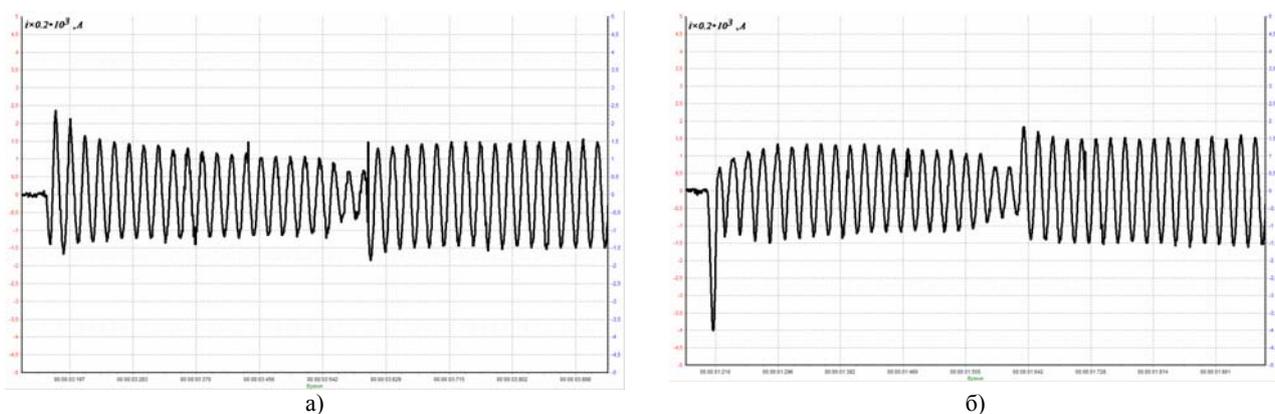


Рис. 1. Осциллограммы пуска электротепломеханического преобразователя энергии при различных начальных скоростях вращения: а)  $\omega_{p0} = 0$ ; б)  $\omega_{p0} = 25$  рад/с

где  $I_{a0}$  - начальное значение аperiodической составляющей тока при  $t = 0$ ,  $\tau$  - постоянная времени аperiodической составляющей,  $T$  - период первой гармоники.

При наличии цифровой осциллограммы и программы её обработки можно определить постоянную времени аperiodической составляющей:

$$\tau = -\frac{\Delta T}{\ln(A'_0 T) / A_0 \cdot T}, \quad (3)$$

Значение  $A_0 T$  и  $A'_0 T$  определяются как суммы мгновенных отсчетов переходного тока  $i_{\Sigma}(t)$  на интервалах наблюдения длительностью  $T$ , умноженные на шаг дискретизации времени (вычисление интегралов методом прямоугольников).

Далее из выражения (2) определяется  $I_{a0}$ . Необходимо указать на то, что полый массивный ротор ЭТМП обладает небольшим моментом инерции в сравнении с массивнороторными асинхронными машинами традиционного исполнения соответствующего типоразмера. Для ЭТМП соотношение постоянных времени электромагнитных  $T_{\Sigma}$  и электромеханических  $T_{\text{эм}}$  переходных процессов на порядок выше и составляет 0,2 единицы и более.

В связи с этим итоговое время пуска шнекового ЭТМП при различной скорости ротора осталось практически одинаковым (см. рис. 1 а, б).

На рис. 2 показана осциллограмма общего потребляемого тока и начальные сигналы датчика движения ротора при пуске ЭТМП с  $\omega_{p0} = 0$ . Угловая скорость ротора в пределах одного (первого) оборота ротора составляет 24,8 рад/с, при этом электромагнитный процесс практически затухает в пределах этого оборота.

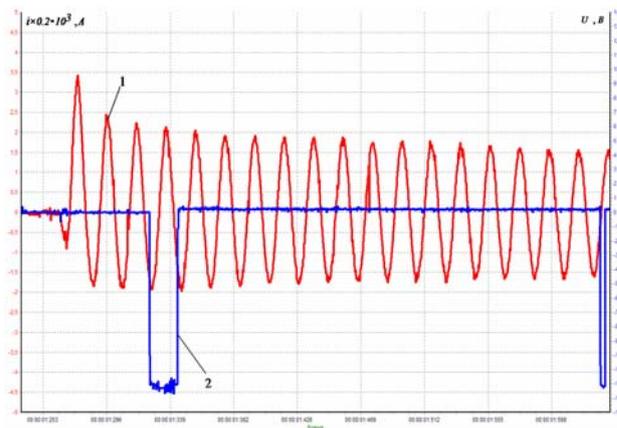
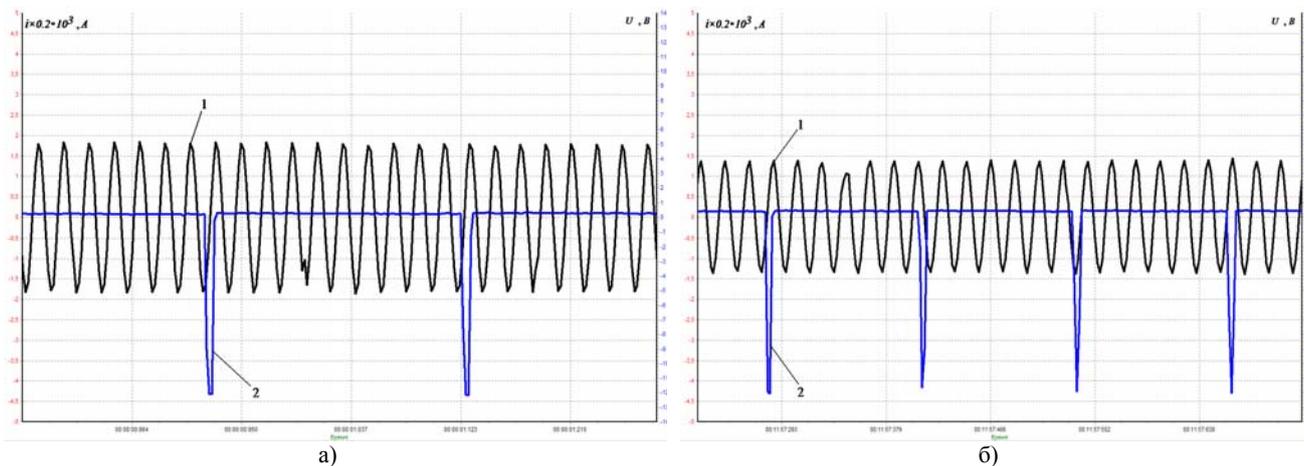
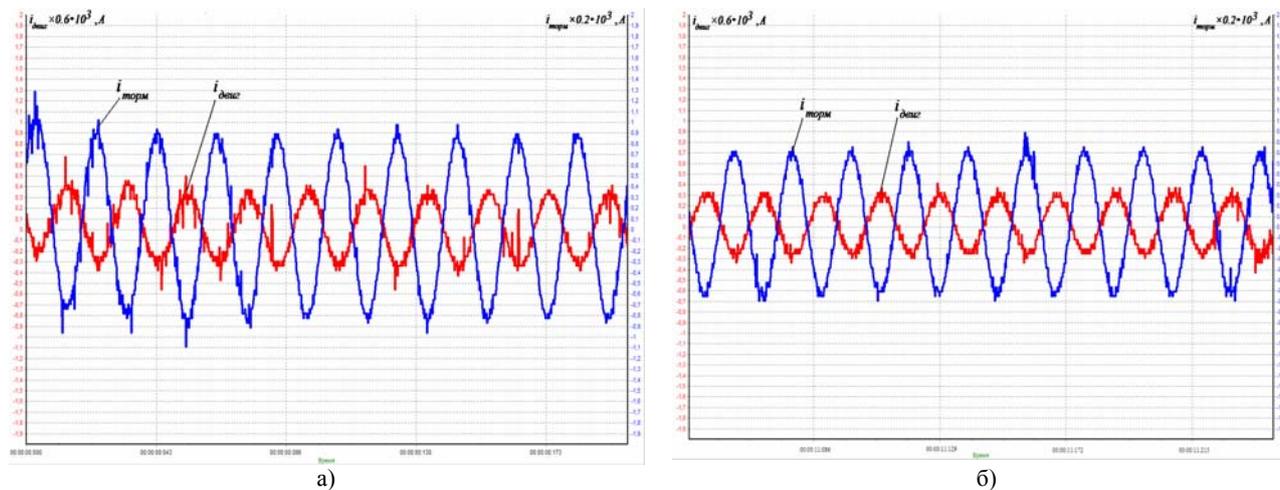


Рис. 2. Осциллограмма пуска ЭТМП: 1 - кривая общего тока; 2 - импульсы датчика движения



1 - кривая тока; 2 - импульс датчика движения

Рис. 3. Осциллограммы изменения общего тока и скорости вращения: а) в начальный момент после пуска; б) по истечению 12 мин



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

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

Скольжение, при котором работает ТМ на третьем участке пуска, составляет  $(2-s_{Д})$ , где  $s_{Д}$  – 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:

$$M_{pi} = \sum_{k=1}^{k=N} M_{ik} = \sum_{k=1}^{k=L} (i'_{2Дk})^2 \frac{R_{2Дk}}{s_{Д}} \frac{m}{\omega_{iД}} \frac{p_{Д}}{2} + \sum_{k=L+1}^{k=N} (i'_{2Тk})^2 \frac{R'_{2Тk}}{s_{Д}} \frac{m}{\omega_{iT}} \frac{p_{Т}}{2}, \quad (4)$$

где  $L$  - число двигательных модулей в ЭТМП;  $i'_{2Дk}$ ,  $i'_{2Тk}$ ,  $R_{2Дk}$ ,  $R'_{2Тk}$ ,  $\omega_{iД}$ ,  $\omega_{iT}$  - текущие значения приведенного тока и активного сопротивления ротора, а также угловых скоростей поля ротора соответственно для ДМ и ТМ;  $m$ ,  $p_{Д}$ ,  $p_{Т}$  - соответственно число фаз и число пар полюсов в модулях ЭТМП. В общем случае при питании от разных источников напряжения ДМ и ТМ могут иметь разные значения числа фаз и полюсов.

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:

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

Достаточно сложная зависимость (4) 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%.

## ВЫВОДЫ

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 ЭТМП.

## ЛИТЕРАТУРА

- [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. отделение, 1980. – 314 с.
- [3] Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: Учебник для вузов. – М.: Высш.шк., 1987. – 248 с.
- [4] Вербовой А.П., Вербовой П.Ф., Сьянов А.М. Электромагнитные параметры асинхронных двигателей с массивными ферромагнитными роторами // Регулируемые асинхронные двигатели. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины. – 1996. – С. 55–56.
- [5] Сьянов 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] Васковский Ю.Н., Заблодский Н.Н. Моделирование полей и характеристик электротепломеханических преобразователей технологического назначения // Техн. электродинамика. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины Тем. вип. "Проблемы сучасної електротехніки", - 2006, част.7. - С. 41-44.
- [7] Заблодский Н.Н. Моделирование динамических режимов и теплообменных процессов электротепломеханических преобразователей // Техн. электродинамика. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины Тем. вип. "Проблемы сучасної електротехніки", - 2004, част.6. - 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.
- [10] Дмитриев К.С. Оценка влияния апериодической составляющей на параметры первой гармоники принужденной составляющей тока КЗ, определяемые разложением в ряд Фурье // Электричество – 2005. - №4. – С.9–14.

Поступила 01.09.2007