

УДК 62-83.001.24

**Н.В. Жукова (канд. техн. наук, доц.), В.И. Литвинов (канд. техн. наук), В.В. Голиков**  
ГВУЗ Донецкий национальный технический университет, г. Донецк  
кафедра автоматизации и телекоммуникаций  
E-mail: Zhnatka@mail.ru, viktorlitvinov@bk.ru, ctpell@gmail.com

## **ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД РЕГУЛИРУЕМОГО ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА – АНАЛОГА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА**

*Линейный асинхронный регулируемый электропривод с возможностью измерения электромагнитного момента выполнен в виде лабораторного стенда, состоящего из постоянного звена, IGBT-инвертора, блока драйверов с оптической развязкой, микропроцессорного блока управления, датчиков тока Холла и блока питания. В предлагаемом техническом решении, формируется результирующее вращающееся магнитное поле статора и ротора с постоянной амплитудой и конфигурацией при заданной частоте преобразователя. В этом случае электромагнитный момент максимален и зависит линейно только от относительной скорости движения результирующего поля машины и ротора в пределах двойной номинальной нагрузки и, соответственно, двойного скольжения. Для измерения электромагнитного момента выполнен стенд, состоящий из спаренных электродвигателей постоянного и переменного токов, фрикционного барабанного тормоза и тормоза, оснащенного динамометром, а также цифрового измерителя скорости ротора двигателя. Результаты эксперимента подтвердили полную аналогию разработанного асинхронного электропривода с электроприводом постоянного тока.*

**Ключевые слова:** микропроцессорный блок управления, драйвер, силовые ключи, инвертор, широтно-импульсный модулятор, алгоритм управления, спаренные электродвигатели, фрикционный барабанный тормоз, динамометр.

### **Введение**

Известно, что современный асинхронный электропривод [1-3] с векторным управлением (VC) или прямым контролем электромагнитного момента (DTC), с вычислением последнего, является полным аналогом электропривода постоянного тока. Однако, с учетом базисных положений [4, 5], касающиеся электродвигателей асинхронного (AC) и постоянного тока (DC), можно утверждать, что это совершенно не так.

«В машине постоянного тока обмотка возбуждения расположена на статоре и поле возбуждения неподвижно. В якоре создаётся вращающееся поле, частота вращения которого равна частоте вращения ротора, а направление вращения поля противоположно вращению ротора. Поэтому поля статора и ротора в машине постоянного тока неподвижны относительно друг друга».

«Электромеханическое преобразование энергии в асинхронной машине осуществляется полями, неподвижными относительно друг друга, а результирующее поле создаётся полями статора и ротора. Ротор может вращаться с той же скоростью, что и поле, или с другой скоростью, однако поля ротора и статора в установившемся режиме неподвижны относительно друг друга».

В установившемся режиме в машине DC токи и поля якоря или ротора относительно якоря или ротора изменяются во времени, периодически меняя своё направление. Коллектор в якоре, коммутируя ток якоря, является его выпрямителем по отношению к внешней цепи.

Поэтому в установившемся режиме ток и поле якоря стационарны по отношению к неподвижному полю возбуждения машины постоянного тока.

Аналогично в установившемся режиме в машине АС ток и поле ротора относительно ротора изменяются во времени, периодически меняя своё направление. Но ток и поле ротора стационарны относительно вращающегося поля статора. Следовательно, асинхронная машина, как объект исследования, значительно упрощается, если рассматривать только относительное движение ротора и совместного магнитного поля статора и ротора. При этом магнитное поле асинхронной машины должно быть постоянной амплитуды и конфигурации при любой частоте его вращения.

В двигателях постоянного или переменного трёхфазного тока кондукционный ток в якоре или индукционный ток в короткозамкнутом роторе всегда находится в плоскости, перпендикуляр к которой ортогонален магнитному полю возбуждения или вращающемуся магнитному полю статора (рис.1, рис.2). То есть, главная полезная информация в геометрии взаимодействующих токов заключается в том, что плоскости этих взаимодействующих токов, введённых кондукционным или индукционным путём, должны быть всегда взаимноперпендикулярны. Только при такой конфигурации токов обеспечивается максимальный электромагнитный момент, что и сделано в машине постоянного тока или в асинхронной машине переменного тока. Это соответствует максимальному электромагнитному моменту  $M_{ЭМ} = C \cdot I$  в пределах максимального тока якоря или  $M_{ЭМ} = c(\omega_n - \omega_p) = cS$  соответственно максимально допустимого скольжения в линейной области работы асинхронного двигателя.

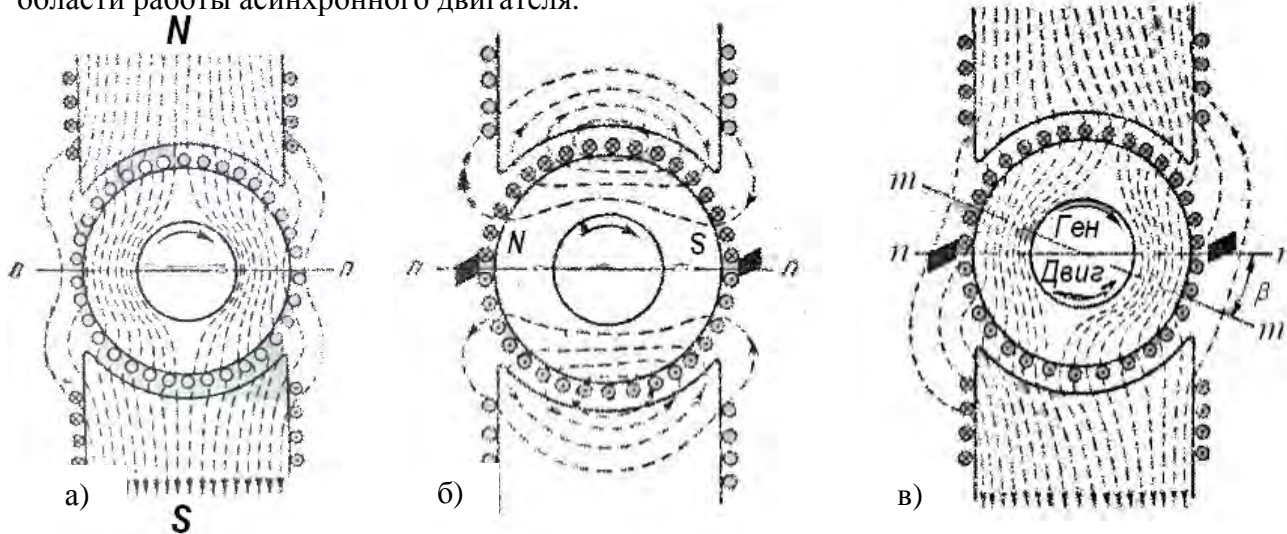


Рисунок 1 – Магнитная система электродвигателя постоянного тока: а) магнитное поле токов независимого возбуждения; б) магнитное поле токов якоря; в) реакция якоря

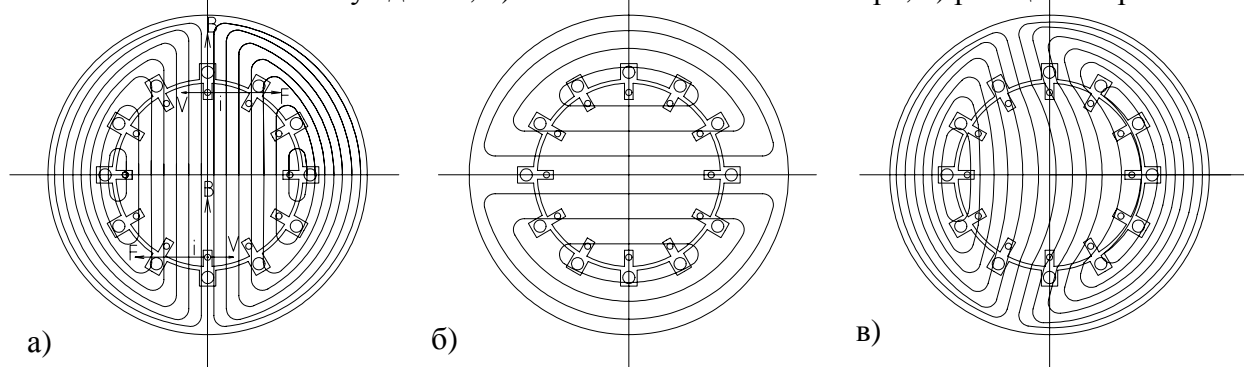


Рисунок 2 – Магнитная система асинхронного электродвигателя с одной парой полюсов (амплитуда и форма магнитного поля кроме его частоты вращения остаются неизменными): а) магнитное поле токов статора; б) магнитное поле токов ротора; в) реакция ротора

Т.е. электромагнитный момент в двигателях постоянного или переменного тока (в линейной области скольжения) имеет простую линейную математическую зависимость от названных параметров. В этом заключается весь смысл применяемой авторами модели [6–9] асинхронной машины.

В существующих асинхронных электроприводах (ЭП) с векторным управлением или прямым контролем электромагнитного момента этот момент регулируется посредством изменения угла между магнитными потоками статора и ротора в асинхронной машине [1–3]. То есть, эти магнитные потоки подвижны относительно друг друга. Это совершенно не соответствует приведенным положениям [4, 5] относительно двух рассматриваемых двигателей. Достаточно напомнить [5], что «...поля, перемещающиеся относительно друг друга, не создают электромагнитного момента, а создают только поток тепловой энергии...». Таким образом, вышесказанное подтверждает, что существующий электропривод VC, DTC не является аналогом электропривода постоянного тока.

В работах [8, 9] подробно рассмотрены разработанные авторами основные блоки с принципиальными схемами регулируемого ЭП, посредством которого реализуется результирующее вращающееся магнитное поле статора и ротора с постоянной амплитудой и формой при заданной частоте преобразователя. При этом поле индуцированного тока ротора всегда перпендикулярно результирующему магнитному полю машины и электромагнитный момент можно измерить посредством простой линейной зависимости  $M_{эм} = c(f_{П} - f_{Р}) = cS$ , что делает разработанный асинхронный ЭП полным аналогом электропривода постоянного тока [8, 9]. На рис. 3а,б показаны фотографии основных блоков разработанного частотного преобразователя, приведенных в [8, 9].

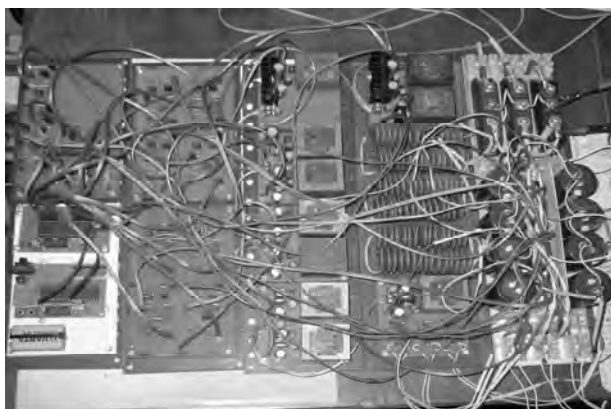


Рисунок 3.а – Лабораторный стенд линейного асинхронного регулируемого электропривода



Рисунок 3.б – Лабораторный стенд линейного асинхронного регулируемого электропривода

### Цель и задачи исследования

Целью данной статьи, которая продолжает работы [8, 9], является проведение измерений электромагнитного момента асинхронной машины  $M_{эм.АС}$  в различных стандартных режимах и подтверждения линейного режима работы разработанного асинхронного регулируемого электропривода в пределах двойной номинальной нагрузки, и соответственно, двойного номинального скольжения. Для достижения данной цели авторами выполнен стенд для измерения электромагнитного момента предлагаемого асинхронного электропривода, состоящего из спаренных электродвигателей постоянного и переменного токов, фрикционного барабанного тормоза и тормоза, оснащенного динамометром, а также цифрового измерителя скорости вращения ротора электродвигателя. На рис.4, 5 показаны принципиальная схема и фотография, выполненного авторами, стенда, а на рис.6 схема цифрового измерителя скорости вращения ротора электродвигателя.

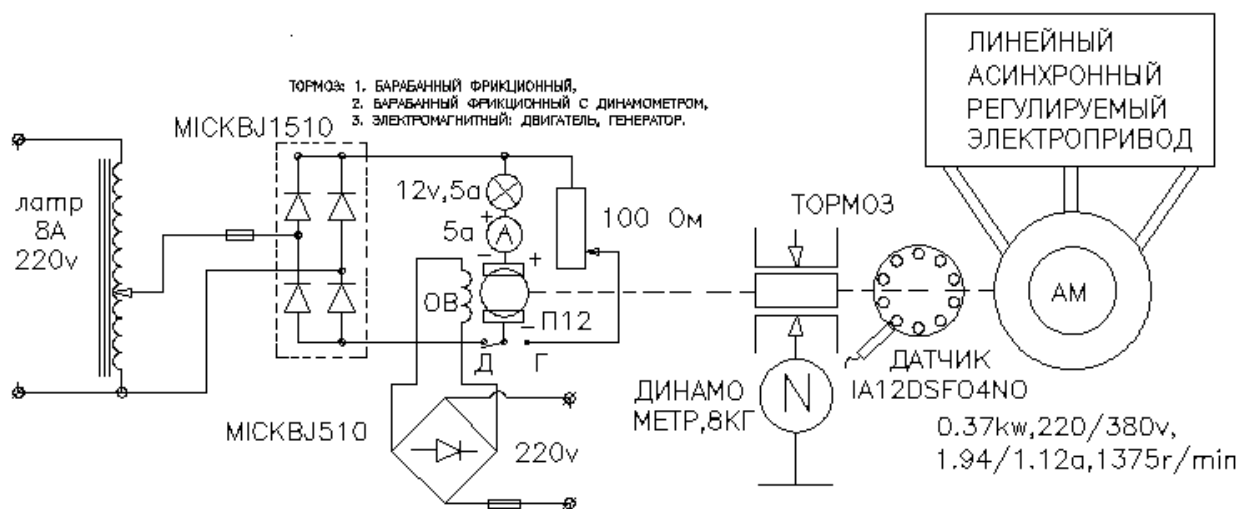


Рисунок 4 – Схема стенда для измерения электромагнитного момента и скорости вращения асинхронного электропривода



Рисунок 5 – Стенд для измерения электромагнитного момента

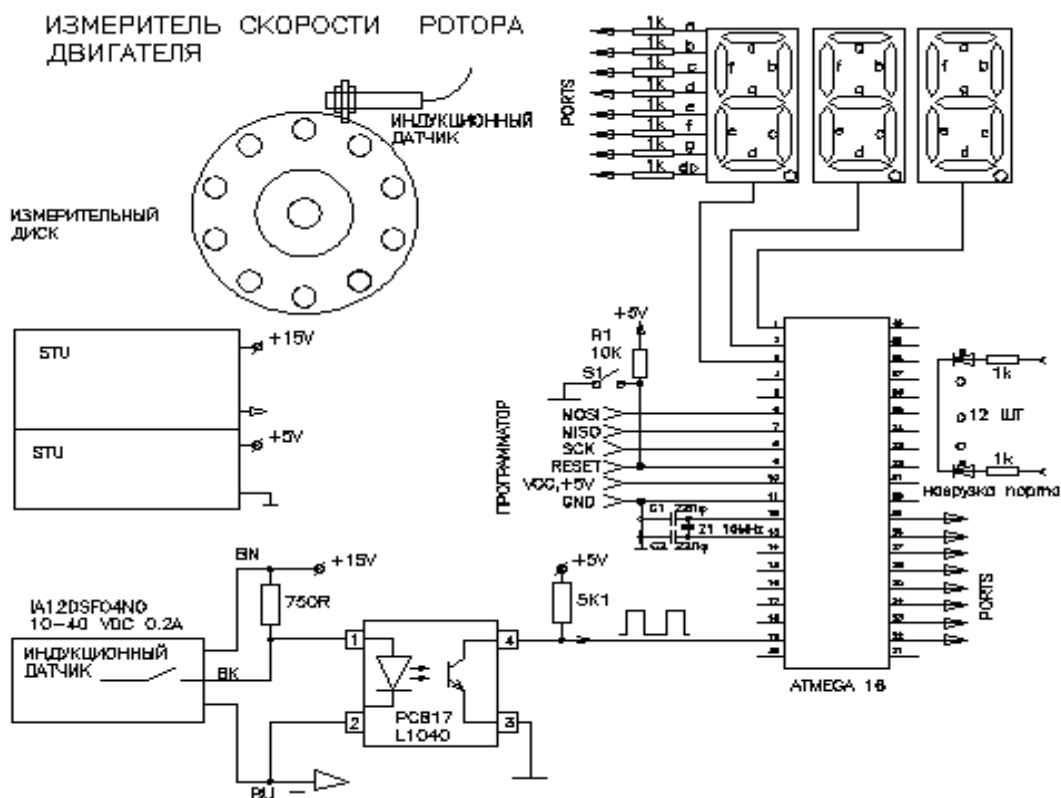


Рисунок 6 – Принципиальная схема измерителя скорости вращения ротора асинхронного электродвигателя

Известно, что измерение электромагнитного момента возможно [10, 11] с помощью электромагнитного тормоза, электродинамического тормоза и фрикционного барабанного тормоза с динамометром. Последний необходим при измерении момента при заторможенном роторе, что соответствует тяжёлому режиму работы асинхронной машины, так как электромагнитный тормоз в данном режиме не работает. На рис.7, 8 показаны общий вид фрикционного барабанного тормоза с динамометром и фотография его исполнения на стенде измерения электромагнитного момента.

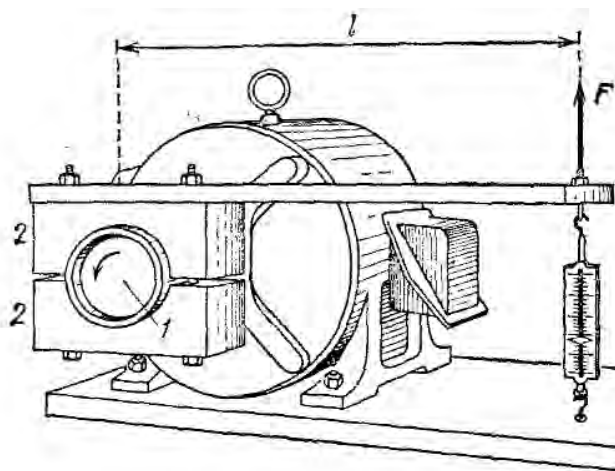


Рисунок 7 – Измерение момента силы, создаваемого электродвигателем

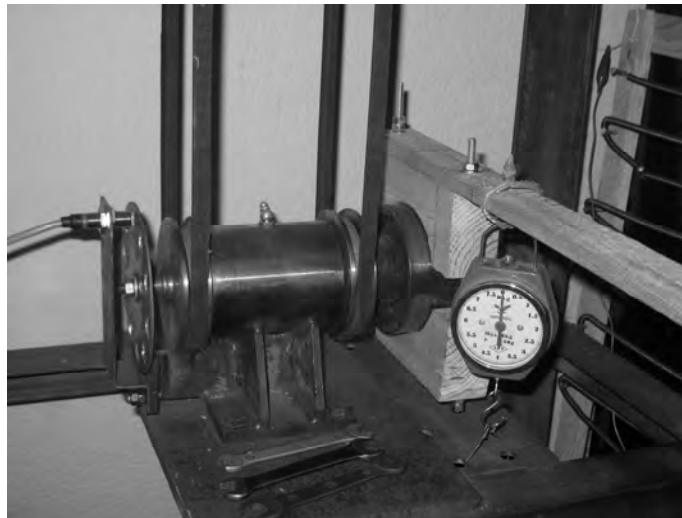


Рисунок 8 – Измерение электромагнитного момента асинхронного электродвигателя с помощью динамометра

На стенд установлены механически связанные (спаренные) электродвигатели (рис. 5):

- асинхронный с номинальными данными: 0,37кВт,  $\Delta/Y$  220/380В; 1,94/1,12 А;

1375 об/мин с двумя парами полюсов ( $p=2$ ),  $M_{эм.ном.AC} = \frac{370 \cdot 60}{2\pi \cdot 1375} = 2,57$  Н·м,

$$S_{ном} = f_{II} - f_P = \frac{1500}{60} - \frac{1375}{60} = 2,08333 \text{ Гц};$$

- постоянного тока типа П12 со смешанным возбуждением при отключенной серийной обмотке и номинальных его параметрах  $P_{ном}=450$  Вт,  $U_{ном}=220$  В,  $I_{ном}=2.88$  А,

$N_{ном}=1500$  об/мин,  $M_{эм.ном.DC} = \frac{450}{2\pi \cdot 25} = 2,865$  Н·м. Исходя из номинальных данных DC

П12 константа машины  $C \approx 1$  В·с, тогда 1А соответствует 1 Н·м. В результате отключения серийной обмотки эта константа будет несколько ниже в динамическом режиме;

- динамометр типа KN-01 (X10NGYING), 0.....8 кг,  $e=50$  гр.

При исследовании введены следующие обозначения:

$f$  - частота преобразователя, Гц;

$f_{II}$  - частота вращения поля машины AC, Гц;

$f_P$  - частота вращения ротора машины AC, Гц;

$S$  - величина абсолютного скольжения  $S = f_I - f_D$ , Гц;

$p$  - число пар полюсов;

$S_{xx.CII}$  - скольжение холостого хода спаренной машины, Гц;

$U_{ПЗ}$  - напряжение постоянного звена, В;

$I_{ПЗ}$  - ток постоянного звена, А;

$U_{Я}$  - напряжение якоря машины DC, В;

$I_{Я}$  - ток якоря машины DC, А;

$M_{C_{xx.CII}}$  - момент сопротивления холостого хода спаренной машины, Н·м;

$M_{дин.}$  - момент сопротивления динамометра, Н·м;

$M_{эм.AC}$  - электромагнитный момент машины AC, Н·м;

$M_{эм.DC}$  - электромагнитный момент машины DC, Н·м.

### Решение задач и результаты эксперимента

Электромагнитный момент асинхронной машины измерялся в разных режимах. Проведенные исследования состоят из нескольких пунктов.

1. Определение момента сопротивления холостого хода спаренной машины.

В измерениях электромагнитного момента асинхронной машины в качестве составляющей должен учитываться момент сопротивления холостого хода спаренной машины  $M_{C_{xx.CП}}$ . Этот момент определялся при отдельном включении машин АС и ДС. Измерения показали, что при включенной машине АС и отключенной машине ДС,  $M_{C_{xx.CП}}$  одинаковый для разных частот  $f$  преобразователя и соответствует абсолютному скольжению  $S_{xx.CП} = f_{П} - f_{P} = \frac{f}{p} - f_{P} \approx 0,5$  Гц, тогда  $M_{C_{xx.CП}} = \frac{0,5 \text{ Гц} \cdot 2,57 \text{ Нм}}{2,08333 \text{ Гц}} = 0,618 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

При включенной машине ДС и отключенной машине АС  $M_{C_{xx.CП}}$  соответствует  $I_{Я} = 0,9$  А, что завышено по отношению к первому случаю. Это свидетельствует о том, что отключение серийной обмотки понизило константу машины ДС. В связи с тем, что сопротивление холостого хода спаренной машины не изменяется, было принято что, ток якоря  $I_{Я} = 0,9$  А соответствует 0,618 Н·м.

2. Измерение электромагнитного момента асинхронной машины  $M_{ЭМ.АС}$  в заторможенном режиме.

При заторможенном роторе ( $f = 4$  Гц,  $f_{П} = 2$  Гц,  $f_{P} = 0$ ), соответствующем напряжении постоянного звена  $U_{ПЗ}$ , полученном при холостом ходе асинхронной машины по графикам [8, 9], появляется номинальный момент  $M_{ЭМ.НОМ.АС}$  в асинхронном электродвигателе, которому противодействует момент сопротивления спаренной системы  $M_{C_{xx.CП}}$  и сопротивление динамометра  $M_{дин.}$ :

$$M_{ЭМ.НОМ.АС} = M_{C_{xx.CП}} + M_{дин.} = 0,618 \text{ Нм} + 1,65 \text{ кг} \cdot 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 0,12 \text{ м} = 2,56 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Отсюда видно соответствие паспортных данных асинхронного двигателя и разработанного регулируемого асинхронного электропривода  $M_{ЭМ.АС} \cong M_{ЭМ.НОМ.АС}$ , а именно:  $2,56 \text{ Н}\cdot\text{м} \cong 2,57 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

Аналогичным образом определяется электромагнитный момент для двигателя постоянного тока в заторможенном режиме:

$$M_{ЭМ.НОМ.ДС} = M_{C_{xx.CП}} + M_{дин.} = 0,618 \text{ Нм} + 1,9 \text{ кг} \cdot 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 0,12 \text{ м} = 2,85 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

что соответствует паспортным данным:  $2,85 \text{ Н}\cdot\text{м} \cong 2,86 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Таким образом, в спаренном состоянии в заторможенном режиме постоянные машин электродвигателей АС и ДС соответствуют друг другу.

При двойном номинале тока машины ДС в заторможенном режиме, устанавливая ток якоря  $I_{Я}$  выше номинала 5 А, что должно соответствовать электромагнитному моменту 5 Н·м, а по факту же получается  $2,9 \text{ кг} \cdot 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 0,12 \text{ м} + 0,618 \text{ Нм} = 4,03 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Поэтому измерение электромагнитного момента асинхронной машины  $M_{ЭМ.АС}$  посредством двигателя ДС ограничивается в пределах номинального значения тока якоря  $I_{Я} \leq I_{НОМ}$ .

3. Измерение электромагнитного момента асинхронной машины  $M_{ЭМ.АС}$  в двигательном режиме.

Электродвигатель постоянного тока используется в генераторном режиме. В связи с тем, что при малых оборотах генератора ДС его ЭДС мала, измерения проводились от нижней границы частоты поля  $f_{II}$ , при которой возможно компенсировать хотя бы половину номинала электромагнитного момента  $M_{эм.ном.АС} = 2,57 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Измерения проводились от нижней границы  $f = 10 \text{ Гц}$ ,  $f_{II} = 5 \text{ Гц}$ ,  $f_P = 3,4 \text{ Гц}$ ,  $S = 1,6 \text{ Гц}$ ,  $R_H = 0 \text{ Ом}$ ,  $I_{я} = 1,4 \text{ А}$ :

$$M_{эм.АС}|_{S=1.6\text{Гц}} = c \cdot S \approx M_{С\text{хх.СП}} + c \cdot I_{я};$$

$$M_{эм.АС}|_{S=1.6\text{Гц}} = 2,03 \text{ Н}\cdot\text{м} \approx 0,618 \text{ Н}\cdot\text{м} + 1 \text{ Вс} \cdot 1,4 \text{ А} = 2,02 \text{ Н}\cdot\text{м}, \text{ т.е. } 2,03 \text{ Н}\cdot\text{м} \cong 2,02 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Такое же значение электромагнитного момента асинхронной машины повторяется на разных частотах ротора  $f_P$  при частоте преобразователя  $f = 10, \dots, 26 \text{ Гц}$  с шагом  $2 \text{ Гц}$ . Подбирая нагрузкой ток якоря  $1,4 \dots 1,5 \text{ А}$  в выше указанном диапазоне  $f$ , всегда наблюдается скольжение, равное  $1,6 \text{ Гц}$ , что подтверждает линейный режим работы разработанного асинхронного электропривода.

4. Измерение электромагнитного момента асинхронной машины  $M_{эм.АС}$  в режиме положительного и последующего отрицательного скольжения при двигательном режиме машины постоянного тока.

Измерения проводились при частоте преобразователя  $f = 4, \dots, 20 \text{ Гц}$  с шагом  $2 \text{ Гц}$ :

при  $f = 4 \text{ Гц}$ ,  $f_{II} = 2 \text{ Гц}$ ,  $f_P = 1,5 \text{ Гц}$ ,  $S = 0,5 \text{ Гц}$ , соответствующих  $U_{ПЗ}$  и  $I_{ПЗ} \approx 1,9 \text{ А}$ , устанавливаем  $I_{я} = 0,9 \text{ А}$ , при котором скольжение становится равным  $S = 0 \text{ Гц}$ . Дальнейшее повышение тока якоря от  $I_{я} = 2 \dots 3 \text{ А}$  приводит к отрицательному скольжению от  $S = -0,5 \text{ Гц}$  до  $S = -1 \text{ Гц}$ .

при  $f = 20 \text{ Гц}$ ,  $f_{II} = 10 \text{ Гц}$ ,  $f_P = 9,5 \text{ Гц}$ ,  $S = 0,5 \text{ Гц}$ , соответствующих  $U_{ПЗ}$  и  $I_{ПЗ} \approx 1,9 \text{ А}$ , устанавливаем  $I_{я} = 0,9 \text{ А}$ , при котором  $S = 0 \text{ Гц}$ . Дальнейшее повышение тока якоря от  $I_{я} = 2 \dots 3 \text{ А}$  приводит к таким же результатам по отрицательному скольжению от  $S = -0,5 \text{ Гц}$  до  $S = -1 \text{ Гц}$ .

Данные измерения подтверждают симметричность и линейность предложенной асинхронной регулируемой машины не только в положительной, но и в отрицательной области скольжения.

5. Режим тяжело нагруженных машин – двойная номинальная нагрузка при заторможенном роторе машины АС.

Двойной номинал нагрузки при заторможенном роторе требует установки двойного номинала тока постоянного звена  $I_{ПЗ} = 4 \text{ А}$  при двойном номинальном скольжении  $S = 4 \text{ Гц}$  соответственно стационарной механической характеристике асинхронной машины (рис.10).

При  $f = 8 \text{ Гц}$ ,  $f_I = 4 \text{ Гц}$ ,  $f_P = 0 \text{ Гц}$ ,  $S = 4 \text{ Гц}$ , появляется двойной номинальный момент  $M_{эм.2ном.АС}$  в асинхронном электродвигателе, который равен

$$M_{эм.2ном.АС} = 4,45 \text{ кГ} \cdot 9,81 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot 0,12 \text{ м} = 5,23 \text{ Н}\cdot\text{м}, \text{ что соответствует } 2 \cdot M_{эм.ном.АС}, \text{ а именно:}$$

$$2 \cdot 2,57 \text{ Н}\cdot\text{м} \cong 5,23 \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad 5,14 \text{ Н}\cdot\text{м} \cong 5,23 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

6. Особенности поведения разработанного ЭП.

Эксперимент показал, что для выбранного двигателя с барабанным фрикционным тормозом в рабочем диапазоне частот и силе тока постоянного звена около двух ампер на холостом ходу электродвигателя, этот ток при появлении нагрузки на валу двигателя не



увеличивается, он наоборот уменьшается на 10-20%, что положительно влияет на динамику электропривода. При этом электропривод работает устойчиво. Такое качественно новое поведение в работе предлагаемого электропривода можно сравнить с последовательно включёнными индуктивностью и ёмкостью, которые имеют минимальное сопротивление в режиме резонанса напряжений, а при появлении проводящего магнитопровода (нагрузки) внутри катушки индуктивности, как показывает практика, ток падает почти в два раза.

Данную особенность резонансного поведения ЭП необходимо в дальнейшем более детально изучить с точки зрения выбора оптимальной частоты модуляции ШИМ [8, 9].

7. Сравнительный анализ электромагнитного момента, полученного по модели разработанного линейного асинхронного ЭП с известной математической зависимостью.

Известно [12, 13], что стационарная механическая характеристика асинхронного двигателя имеет явно нелинейный вид (рис.10). Она имеет короткий линейный участок на начальном отрезке относительного скольжения, не превышающего 5...8% от единичного скольжения. Длины этого отрезка вполне достаточно, чтобы на этом участке организовать линейный регулируемый электропривод при условии получения вращающегося магнитного поля с постоянной амплитудой и конфигурацией для текущей частоты преобразователя [6–9].

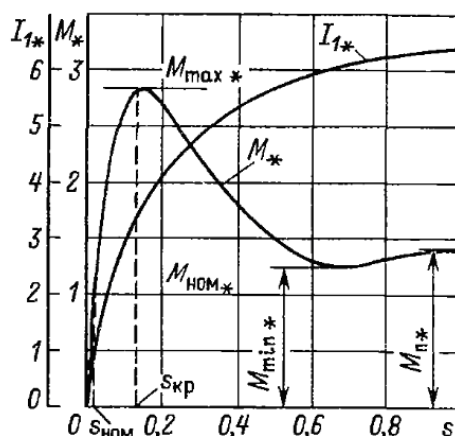


Рисунок 10 – Зависимость тока и момента асинхронного электродвигателя от скольжения

Сравним известное [13] выражение электромагнитного момента  $M_{эм.АС}$ :

$$M_{эм.АС} = \frac{m_1 U_1^2 \frac{r_2'}{S}}{\omega \left[ \left( r_1 + c_1 \frac{r_2'}{S} \right)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2 \right]},$$

при  $S \ll 1$  равно:

$$M_{эм.АС} = \frac{m_1 U_1^2}{\omega c_1^2 r_2'} S, \quad (1)$$

с выражением, полученным по предлагаемой авторами линейной модели асинхронного электродвигателя [7], а именно:

$$\begin{cases} L \frac{dI}{dt} + RI + \omega_p r l B = \omega_{II} r l B \\ J \frac{d\omega_p}{dt} = p \cdot I r l B - M_{нагр}. \end{cases}$$

В стационарных условиях электромагнитный момент  $M_{эм.АС} = p \cdot IrlB$  имеет вид:

$$M_{эм.АС} = p \cdot \frac{1}{R} (rlB)^2 (\omega_{II} - \omega_P), \text{ где } I = \frac{1}{R} (\omega_{II} - \omega_P) rlB.$$

Известно, что для индуктивной нагрузки имеет место выражение:

$$R \cdot I(t) + \frac{d\Psi(t)}{dt} = R \cdot I(t) + L \frac{dI(t)}{dt} = U(t),$$

или

$$RI_0 \sin \omega t + \omega LI_0 \cos \omega t = I_0 \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \sin(\omega t + \varphi) = U_0(\omega t + \varphi),$$

где  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}$ ,  $I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$  - амплитуда синусоидального тока в фазной обмотке,

$B = CI_0$ ,  $C_1 = rl$ . Тогда

$$M_{эм.АС} = p \frac{c_1^2}{R} c^2 I_0^2 (\omega_{II} - \omega_P) \frac{\omega_{II}}{\omega_P} = p \frac{c_1^2}{R} c^2 I_0^2 S_{отн} \frac{\omega}{p} = \frac{c}{R} I_0^2 S_{отн} \omega,$$

$$M_{эм.АС} = \frac{c}{R} \frac{U_0^2 \omega}{(\omega^2 L^2 + R^2)} S_{отн}. \quad (2)$$

Сравнивая (1) и (2) можно сделать вывод, что выражения для электромагнитных моментов практически одинаковые, если учесть, что (1) в [13] записано для номинальной частоты двигателя.

### Выводы

1. Для измерения электромагнитного момента асинхронного электропривода выполнен стенд, состоящий из спаренных электродвигателей постоянного и переменного токов, фрикционного барабанного тормоза и тормоза, оснащенного динамометром, а также цифрового измерителя скорости вращения ротора электродвигателя.

2. Выполнены измерения электромагнитного момента асинхронной машины в различных стандартных режимах: при заторможенном роторе с номинальной и двойной номинальной нагрузкой, при положительном или отрицательном скольжении ротора по отношению к скорости вращения магнитного поля машины. Результаты измерений показали, что предлагаемый электропривод имеет электромагнитный момент, линейно зависящий от скольжения между скоростью вращения поля статора и скоростью ротора. Коэффициент пропорциональности равен константе машины.

3. Сравнительный анализ электромагнитного момента, полученного по математической модели разработанного линейного асинхронного электропривода, с известной математической зависимостью электромагнитного момента от скольжения показал, что модель линейна в пределах двойной номинальной нагрузки, и соответственно, двойного номинального скольжения.

4. Выявлена особенность резонансного поведения разработанного электропривода, заключающаяся в том, что в рабочем диапазоне частот преобразователя и силе тока постоянного звена, равному тройному фазному току холостого хода электродвигателя, этот ток при появлении нагрузки на валу электродвигателя не увеличивается, а даже уменьшается на 10-20%. Изучение вышеназванной особенности работы электропривода с точки зрения выбора оптимальной резонансной частоты модуляции ШИМ будет рассмотрено авторами в последующих работах.

**Список использованной литературы**

1. Исследование электромагнитных процессов в асинхронном электродвигателе с преобразователем частоты / П. Э. Ишханов, А.М. Чуриков // Приводная техника. - 1998.- №3.- С.12-16.
2. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учеб. / Соколовский Г. Г. - 2-е изд., испр. - М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 272 с.
3. Усольцев А. А. Частотное управление асинхронными двигателями: учеб. пособие/ Усольцев А. А. – СПбГУ: ИТМО, 2006. - 94 с.
4. Копылов И.П. Электрические машины: учеб. / Копылов И.П. - 4-е изд., испр. - М.: Высш. шк., 2004. - 607с.
5. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: учеб./ Копылов И.П. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 2001. - 327с.
6. Лінійний асинхронний регульований електропривод: патент на винахід № 92712 С2: МПК НО2Р 9/00 /Жукова Н.В., Литвинов В.І., Литвинова Т.С.; власник патенту Жукова Н.В., Литвинов В.І., Литвинова Т.С. - № а200901158; заявл. 13.02.2009; опубл. 25.11.2010, Бюл. №22.
7. Асинхронный регулируемый электропривод на основе его линейной модели / Жукова Н.В. // Електротехніка та енергетика: Зб. наук. праць Донецького національного технічного університету. – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – Вип. 11(186) - С. 125 – 132.
8. Лабораторный стенд регулируемого линейного асинхронного электропривода / Жукова Н.В., Литвинов В.І., Голиков В.В. // Обчислювальна техніка та автоматика: Зб. наук. праць Донецького національного технічного університету. – Донецьк: ДонНТУ, 2013. – Вип. 2(25) - С. 207–216.
9. Лінійний асинхронний регульований електропривод: патент на винахід № 104919 С2: МПК НО2Р 9/46 /Жукова Н.В., Литвинов В.І., Литвинова Т.С., Голиков В.В.; власник патенту Жукова Н.В., Литвинов В.І., Литвинова Т.С., Голиков В.В. - № а201206027; заявл. 18.05.2012; опубл. 25.03.2014, Бюл. № 6.
10. Перельмутер Н. М. Электромонтёр - обмотчик и изолировщик по ремонту электрических машин: учеб. / Перельмутер Н. М. – М.: Высш. школа, 1980. – 220 с.
11. Кацман М. М. Руководство к лабораторным работам по электрическим машинам и электроприводу: учеб. пособие / Кацман М. М. – 2-е изд., испр.-М.: Высш. шк., 2001.- 215 с.
12. Справочник по электрическим машинам / под общей ред. И.П. Копылова и Б. К. Клокова; Т 1. - М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
13. Токарев Б.Ф. Электрические машины: учеб. пособие / Токарев Б.Ф.- М.: Энергоатомиздат, 1990. - 624с.

**References**

1. Ishhanov, P. Je. and Churikov, A.M. (1998), “Research of electromagnetic processes in the asynchronous motor with frequency converter”, *Privodnaja tehnika*, no.3, pp. 12-16.
2. Sokolovskij, G. G. (2007), *Jelektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovanijem* [AC drives with frequency control], 2nd ed., Akademija, Moscow, Russia.
3. Usol'cev, A. A. (2006), *Chastotnoe upravlenie asinhronnymi dvigateljami* [Frequency control of asynchronous motors], SPbGU ITMO, St. Petersburg, Russia.
4. Kopylov, I.P. (2004), *Jelektricheskie mashiny* [Electrical machines], 4nd ed., Vyssh. shk., Moscow, Russia.
5. Kopylov, I.P. (2001), *Matematicheskoe modelirovanie jelektricheskij mashin* [Mathematical modeling of electrical machines], 3nd ed., Vyssh. shk., Moscow, Russia.

6. Zhukova, N.V., Litvinov, V.I. and Litvinova, T.S. Zhukova, N.V., Litvinov, V.I., Litvinova, T.S. (2010), *Linijnij asinhronnij regul'ovaniy elektroprivod* [Linear asynchronous regulated electric drive], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat. № 92712 C2.
7. Zhukova, N.V. (2011), "Asynchronous electric drive based on its linear model", *Naukovi praci DonNTU*, no. 11(186), pp. 125 – 132.
8. Zhukova, N.V., Litvinov, V.I. and Golikov, V.V. (2011), "Laboratory bench of controlled linear asynchronous electric drive", *Naukovi praci DonNTU*, no. 2 (25), pp. 207–216.
9. Zhukova, N.V., Litvinov, V.I., Litvinova, T.S. and Golikov V.V. Zhukova, N.V., Litvinov, V.I., Litvinova, T.S., Golikov V.V. (2014), *Linijnij asinhronnij regul'ovaniy elektroprivod* [Linear asynchronous regulated electric drive], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat. № 104919 C2.
10. Perel'muter, N. M. (1980), *Jelektromontjor - obmotchik i izolirovshhik po remontu jelektricheskikh mashin* [Electrician and insulation worker for repair of electrical machines], Vyssh. shk., Moscow, Russia.
11. Kacman, M. M. (2001), *Rukovodstvo k laboratornym rabotam po jelektricheskim mashinam i jelektroprivodu* [Manual for laboratory works on electric machines and electric drive], 2nd ed., Vyssh. shk., Moscow, Russia.
12. Kopylov, I.P. (ed.) (1988), *Spravochnik po jelektricheskim mashinam* [Reference book on electric machines], Jenergoatomizdat, Moscow, Russia.
13. Tokarev, B.F. (1990), *Jelektricheskije mashiny* [Electrical machines], Jenergoatomizdat, Moscow, Russia.

Надійшла до редакції:  
30.04.2014 р.

Рецензент:  
докт. техн. наук, проф. Зорі А.А.

**Н.В. Жукова, В.І. Литвинов, В.В. Голиков**

**ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»**

**Лабораторний стенд регульованого лінійного асинхронного електроприводу – аналога електроприводу постійного струму.** Лінійний асинхронний регульований електропривод з можливістю виміру електромагнітного моменту виконаний у вигляді лабораторного стенду, що складається з постійної ланки, IGBT-інвертора, блоку драйверів з оптичною розв'язкою, мікропроцесорного блоку управління, датчиків струму Холла і блоку живлення. У запропонованому технічному рішенні, формується результуюче обертове магнітне поле статора і ротора з постійною амплітудою і конфігурацією при заданій частоті перетворювача. У цьому випадку електромагнітний момент максимальний і залежить лінійно тільки від відносної швидкості руху результуючого поля машини і ротора в межах подвійного номінального навантаження і, відповідно, подвійного ковзання. Для вимірювання електромагнітного моменту виконаний стенд, що складається з спарених електродвигунів постійного і змінного струмів, фрикційного барабанного гальма і гальма, оснащеного динамометром, а також цифрового вимірювача швидкості ротора двигуна. Результати експерименту підтвердили повну аналогію розробленого асинхронного електроприводу з електроприводом постійного струму.

**Ключові слова:** мікропроцесорний блок керування, драйвер, силові ключі, інвертор, широтно-імпульсний модулятор, алгоритм управління, спарені електродвигуни, фрикційне барабанне гальмо, динамометр.

**N.V. Zhukova, V.I. Litvinov, V.V. Golikov**

**Donetsk National Technical University**

**Laboratory bench of controlled linear asynchronous electric drive – analog of DC-drive.** This article presents a laboratory bench of controlled linear asynchronous electric drive, which is similar to DC drive.

Carried on the bench research focuses on proof of this assertion. This article shows the photos developed by the authors, the laboratory bench linear asynchronous electric drive. The proposed technical solution is formed resulting rotating magnetic field of the stator and rotor with constant amplitude and configuration, but with the ability to change its speed. In this case, the electromagnetic torque is a maximum and depends linearly on the relative velocity of the resulting field of electric machine and rotor within the limits of double rated load and, respectively, dual sliding. To measure the electromagnetic torque is made stand, consisting of twin motors of DC and AC, friction drum brake and equipped with a dynamometer and digital measuring device of speed rotor. The measurements of the electromagnetic torque of the asynchronous machine in various standard modes: locked rotor, positive or negative slip of the rotor respect to the field of the machine and in the mode of the heavily laden machines - the double nominal load locked rotor. The measurement results showed that the proposed electric drive has the electromagnetic torque is linearly dependent on the slip between the rotational speed of the stator field and rotor speed. The proportionality coefficient equal constant of machine. The comparative analysis of the electromagnetic torque, which was obtained on a mathematical model of a linear asynchronous electric drive, with a known mathematical dependence of electromagnetic torque from slipping showed that the model is linear within the limits of double rated load and, respectively, dual slipping. The features of of the resonant behavior of the developed asynchronous electric drive. In operating range of frequencies of the converter and strength of current rectifier, which equal to triple no-load current phases of electric motor, this current is not increased, even it is reduced by 10-20%, when a load on the motor shaft.

**Keywords:** microprocessor control unit, driver, power switches, inverter, PWM control algorithm, twin motors, friction drum brake, dynamometer.



**Жукова Наталья Викторовна**, Украина, закончила Донецкий государственный технический университет, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматики и телекоммуникаций ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (ул. Артема, 58, г. Донецк, 83001, Украина). Основное направление научной деятельности – автоматизация, электропривод непрерывных прокатных станов, моделирование и управление технологическими процессами.



**Литвинов Виктор Иванович**, Украина, закончил Донецкий государственный университет (ДонГУ), специальность физика, канд. техн. наук. Основное направление научной деятельности – механическое оборудование, обработка металлов давлением, электропривод непрерывных прокатных станов.



**Голиков Владимир Владимирович**, Украина, закончил Донецкий национальный технический университет, специалист по компьютеризированным системам управления и автоматики. Основное направление научной деятельности – встроенные системы управления, микропроцессорная техника.