

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](mailto:Zhnatka@mail.ru), [viktorlitvinov@bk.ru](mailto:viktorlitvinov@bk.ru), [ctpell@gmail.com](mailto:ctpell@gmail.com)

## ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД РЕГУЛИРУЕМОГО ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

*Линейный асинхронный регулируемый электропривод 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, но с возможностью изменения его частоты вращения. 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.*

**Ключевые слова:** микропроцессорный блок управления, драйвер, силовые ключи, инвертор, широтно-импульсный модулятор, алгоритм управления.

### Общая постановка проблемы

В работах [1-3] авторами сформулирована задача и ее решение по реализации регулируемого асинхронного электропривода не с вычислением, а с измерением электромагнитного момента. Разработанный метод регулирования асинхронного электропривода основывается на известных базисных положениях, которые хорошо освещены в работах Копылова П.И.[4,5]:

«Электромеханическое преобразование энергии в электрических машинах связано с вращающимся магнитным полем. При этом, в понятие стационарного вращающегося поля вкладывается тот смысл, что в любой момент времени амплитуда и форма магнитного поля остаются неизменными», а по отношению к частотному преобразователю, может изменяться только частота вращения этого поля.

«Электромеханическое преобразование энергии осуществляется полями, неподвижными относительно друг друга, а результирующее поле в машине создается 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».

«Поля, перемещающиеся относительно друг друга, не создают электромагнитного момента, а создают только поток тепловой энергии...».

Если вышеназванные положения реализовать в частотно регулируемом асинхронном электроприводе, тогда электромагнитный момент не вычисляется, а измеряется посредством зависимости  $M_{эм} = c \frac{(f_{п} - f_{р})}{f_{п}} = cS$  на линейном участке стационарной механической характеристики асинхронного электродвигателя.

Известно, что для формирования вращающегося магнитного поля необходимо фазные обмотки в статоре расположить по отношению друг к другу согласно поворотной симметрии под  $120^{\circ}$  и в этих фазных обмотках сформировать токи синусоидальной зависимости от времени и сдвинутые по отношению друг к другу на  $120^{\circ}$ . В работах [1-3] авторами разработан метод получения вращающегося магнитного поля с неизменными его амплитудой и формой посредством синусоидальных фазных токов постоянной амплитуды на любой частоте преобразователя.

#### **Постановка задач исследования**

Целью статьи является разработка авторами лабораторного стенда регулируемого линейного асинхронного электропривода на основе предложенного метода управления, что позволило значительно упростить модель управления асинхронной машиной на основе измерения, а не вычисления электромагнитного момента, как это выполнено в существующих аналогах преобразователей частоты с векторным управлением и с прямым контролем момента.

Реализация лабораторного стенда заключалась в разработке авторами основных блоков частотного преобразователя:

1. Микропроцессорный блок управления электроприводом.
2. Блок драйверов силовых ключей трех независимых инверторов для каждой фазы электропривода.
3. Силовой блок, состоящий из постоянного звена и трёхканального инвертора, каждый канал которого содержит четыре силовых ключа.
4. Блок измерения фазных токов и тока постоянного звена на основе датчиков тока Холла.
5. Блок питания с необходимым количеством гальванических развязок.

Для управления асинхронным электроприводом разработаны:

1. Алгоритм расчёта длительностей тактового  $\Delta t$  и рабочего импульса  $\Delta \tau$  ШИМ-а, массивы которых размещаются в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ) микропроцессора.
2. Алгоритм управления силовыми ключами трёхканального инвертора асинхронного электропривода.

#### **Решение задач и результаты исследований**

Лабораторный стенд линейного асинхронного регулируемого электропривода содержит четыре основных блока (рис. 1).

Микропроцессорный блок управления 1 (рис. 2) на основе разработанных алгоритмов и программ реализует трёхканальное широтно-импульсное управление силовыми IGBT-транзисторами.

С целью разделения функции управления ШИМ-ом с функцией формирования внешних цепей задания частоты привода и её индикации, здесь используются два микропроцессора ATMEGA 16. Названные микропроцессоры программировались на языке assembler посредством программатора AVR ISP USB Light v 4.18. Выходы 1-го блока соединены с входами 2-ого трёхканального блока драйверов силовых ключей, которые непосредственно управляют IGBT-транзисторами трёхканального инвертора. Три канала 2-го блока идентичны и соответствуют фазам А, В, С, один из которых показан на рис.3. Каждый силовой ключ имеет свой драйвер (рис.4), гальванически развязанный с цепями процессора, что обеспечено наличием оптопар и необходимым количеством развязанных стабилизированных источников питания. Выходы 2-го блока соединены с входами 3-го силового блока, состоящего из трёх однофазных четырёхключевых инверторов и общего постоянного звена. Схема 3-го силового блока показана на рис.5. Трёхканальный инвертор выполнен на основе двух шестиключевых IGBT-модуля FS10R06VE3-B2. Силовой выпрямитель (постоянное звено) составлен из трёх диодных полумостов МДД-40-12.

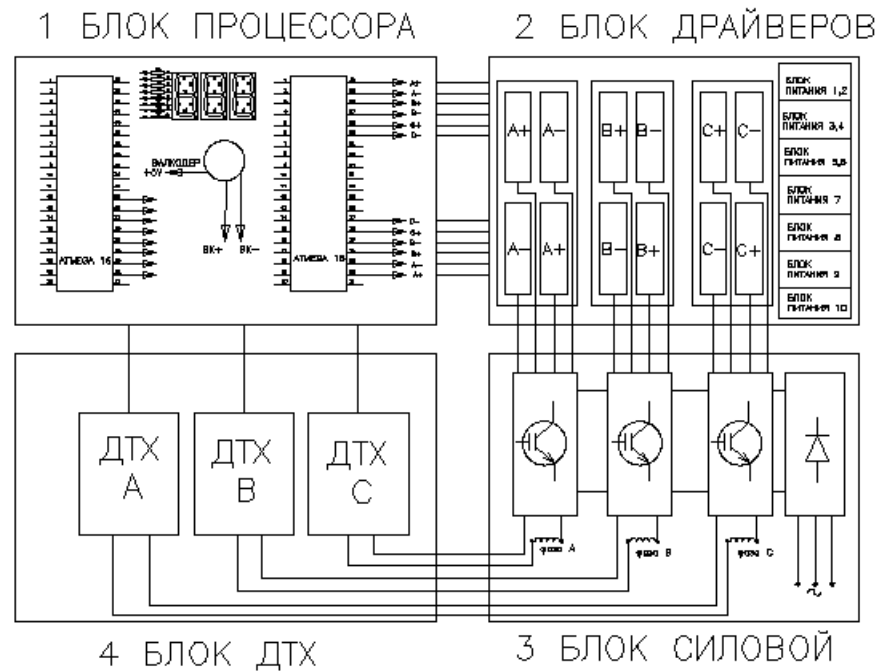


Рисунок 1 - Блок - схема лабораторного стенда

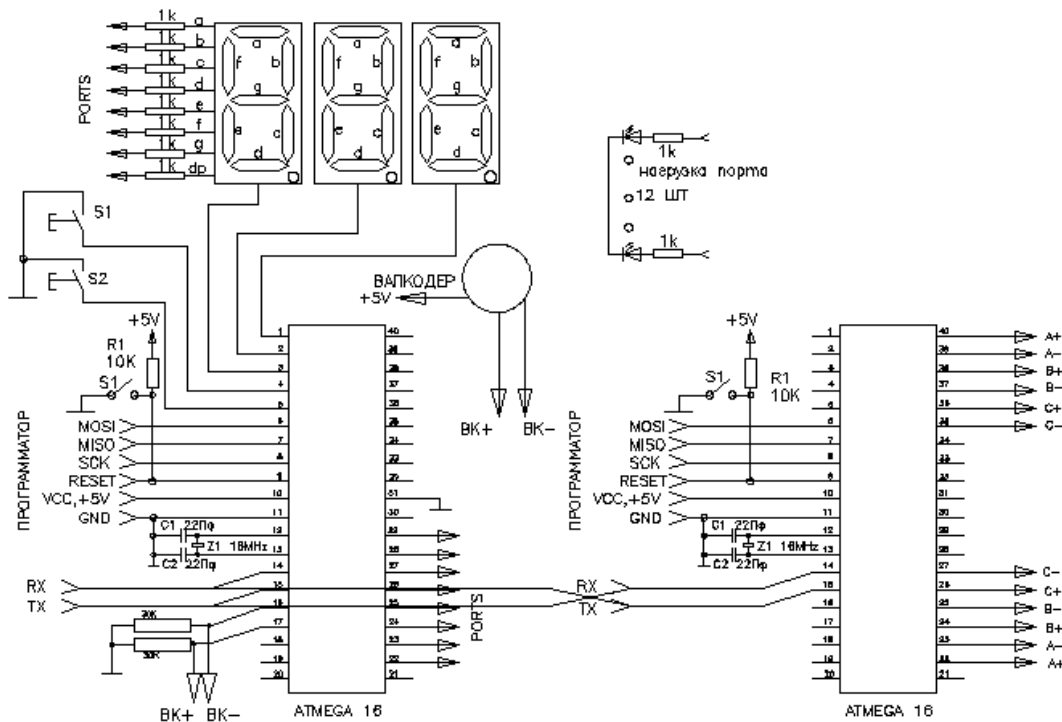


Рисунок 2 - Принципиальная схема микропроцессорного блока

Сетевой низкочастотный фильтр большой ёмкости подключён к выходу силового выпрямителя, а высоковольтный фильтр малой ёмкости (снабберы) подсоединён непосредственно к питающим шинам IGBT-модулей. В середины полумостов однофазных инверторов подключены фазные обмотки асинхронного двигателя с номинальными данными: 0,37кВт,  $\Delta/Y$  220/380V; 1,94/1,12 А; 1375 об/мин с двумя парами полюсов ( $p=2$ ),  $M_{эм. ном}=2,57Нм$ . Последовательно с фазными обмотками и постоянным звеном соединены датчики тока Холла (ДТХ). Последние установлены в 4-ый блок электропривода (рис.6).



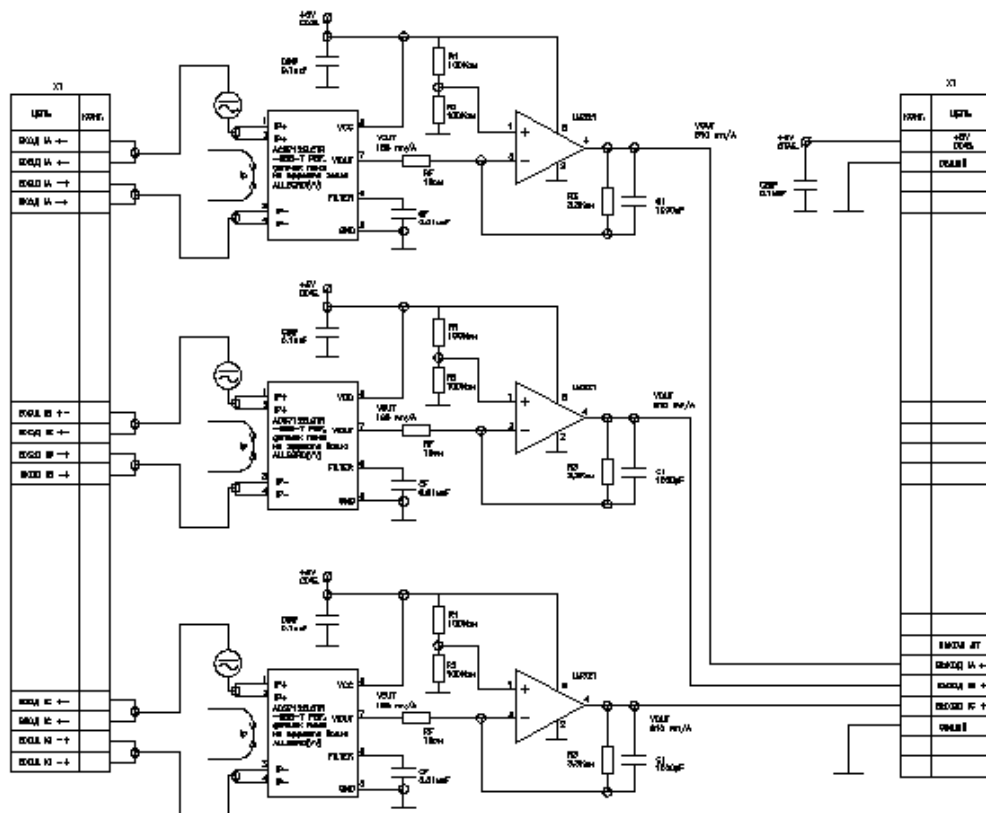


Рисунок 6 - Принципиальная схема датчиков тока Холла трёх фаз двигателя

Нижний уровень управления электроприводом направлен на формирование в фазных обмотках асинхронного электродвигателя трёх синусоидальных токов постоянной амплитуды с заданной частотой  $f$ , изменяющейся в заданном диапазоне, при постоянном напряжении силового выпрямителя.

Разработано математическое обеспечение работы широтно-импульсного модулятора, обеспечивающего формирование на индуктивной нагрузке (фазной обмотке) синусоидального тока постоянной амплитуды при различной частоте  $f$ . Синусоида с

заданной частотой  $f = \frac{1}{T}$  делится на  $n$  отрезков, одинаковых по времени  $\Delta t = \frac{T}{n} = \frac{1}{f \cdot n}$ ,

которые называются тактовыми импульсами. Синусоида состоит из 4-х симметричных участков, а таких синусоид надо сформировать в количестве 3-х штук, смещённых относительно друг друга на  $120^\circ$ . Тогда количество отрезков  $n$  должно быть кратным  $3 \cdot 4 = 12$ -и единицам, то есть  $n = 12 \cdot i$ . Здесь  $i$  - целое число, выбор которого зависит от

условия инвариантности длины отрезка  $\Delta t = \frac{T}{n} = \frac{1}{f \cdot n} = \frac{1}{f \cdot 12 \cdot i} \approx const$  в заданном диапазоне

изменения частоты  $f$ . Например, частота  $f = 0.5 \dots 50$  Гц изменяется с шагом 0,25 Гц. Тогда количество разбиений синусоиды для любой заданной частоты  $f$  должно быть не менее  $n = 24$  при  $f = 50$  Гц и не более  $n = 1200$  при  $f = 1$  Гц, чем обеспечивается минимальная потеря энергии при перемагничивании магнитопровода двигателя. Следовательно, при

выполнении вышеупомянутого условия инвариантности  $\Delta t = \frac{1}{f \cdot 12 \cdot i} \approx const$ , целое число  $i$

должно быть функцией частоты  $f$ , а именно  $i = \text{целая часть} \left[ \frac{100}{f} \right]$ . Величина тактового импульса  $\Delta t = 1 \pm 0.2 \text{ мс} \approx \text{const}$  в диапазоне частоты  $f = 0.25 \dots 50 \text{ гц}$ .

На рис. 7 показаны геометрия синусоиды, деление её на трапецеидальные участки, сумма площадей которых приближённо равна площади синусоиды, и эквивалентная им замена прямоугольниками с одинаковой высотой, равной напряжению  $U$  постоянного звена, и разными их ширинами.

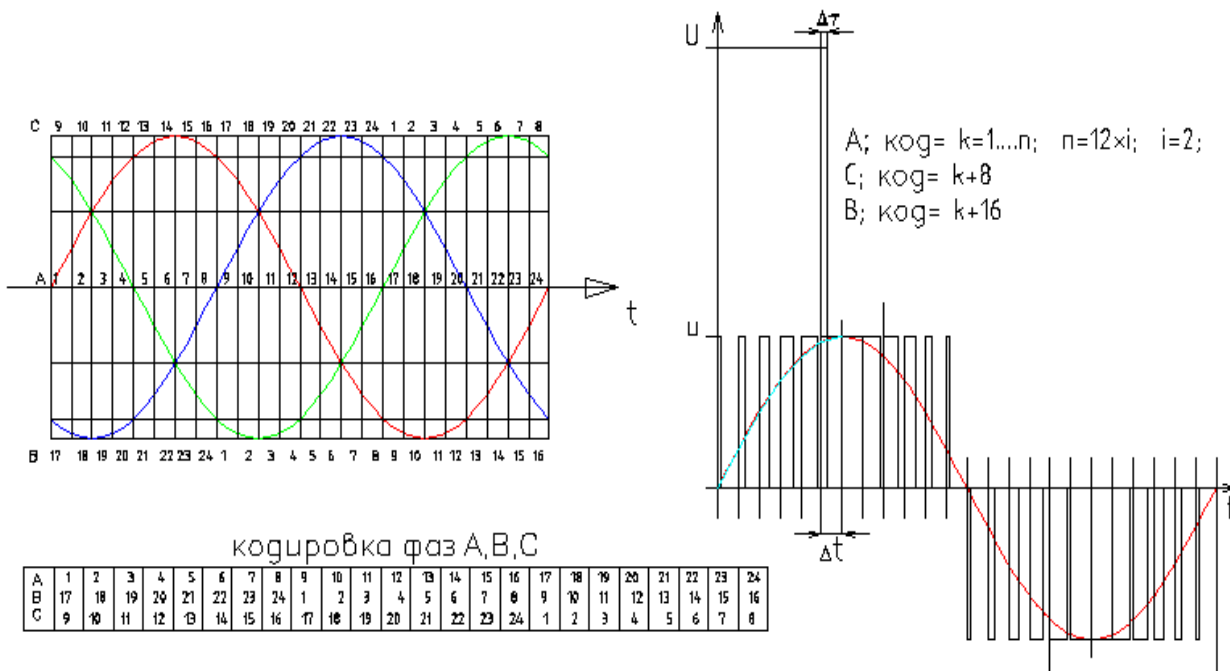


Рисунок 7 – Геометрическая и временная кодировки элементов синусоиды для идентификации ШИМ-а

Площадь каждого трапецеидального участка синусоиды равна площади соответствующего прямоугольника. Сказанное эквивалентно следующим выражениям:

$$\frac{1}{2} \frac{2\pi}{n} u(f) \left\{ \sin \left[ \frac{2\pi}{n} (k-1) \right] + \sin \left( \frac{2\pi}{n} k \right) \right\} = U \Delta \varphi,$$

$$\Delta \varphi = \varepsilon(f) \frac{\pi}{n} \left\{ \sin \left[ \frac{2\pi}{n} (k-1) \right] + \sin \left( \frac{2\pi}{n} k \right) \right\},$$

$$\varepsilon(f) = \frac{u(f)}{U} \leq 1,$$

$$\frac{\Delta \varphi}{2\pi} = \frac{\Delta \tau}{T},$$

$$\Delta \tau = \varepsilon(f) \frac{T}{2n} \left\{ \sin \left[ \frac{2\pi}{n} (k-1) \right] + \sin \left( \frac{2\pi}{n} k \right) \right\},$$

где  $n = 12 \cdot i$  - число разбиений периода  $T$  синусоиды,  $i = \text{целая часть} \left[ \frac{100}{f} \right]$ ;  $k = 1 \dots n$  - текущий номер элемента трапеции или номер её кода;  $U$ -напряжение постоянного звена

(высота прямоугольника);  $\Delta\varphi$  - ширина эквивалентного прямоугольника с высотой, равной  $U$ ;  $\Delta\tau$  - длительность рабочего импульса с номером кода, равного  $k$ , используемого в работе широтно-импульсного модулятора;  $u(f)$  - эквивалентная амплитуда синусоидального напряжения с текущей частотой  $f$ .

На рис. 7 представлена кодировка состояния деления трёх синусоид фаз А, В, С для работы широтно-импульсного модулятора при  $f = 50\text{Гц}$ , чем обеспечивается базис не только по формированию синусоидальных токов, но и необходимый их сдвиг по фазе, соответственно меняя при этом начало и конец кода тактовых импульсов. Для фазы А:  $k = 1 \dots n$ ; для фазы В:  $k = (i \cdot 8 + 1) \dots n \dots i \cdot 8$ ; для фазы С:  $k = (i \cdot 4 + 1) \dots n \dots i \cdot 4$ . То есть, в ШИМ-е реализована также функция фазовращателя.

Для выбранного двигателя абсолютное номинальное скольжение между скоростью вращения магнитного поля машины и скоростью вращения ротора, при котором возникает номинальный электромагнитный момент, приложенный к ротору двигателя (в границе линейной области нагрузочной характеристики), составляет  $S_n = f_{\Pi} - f_p = \frac{1500 - 1375}{60} = 2,083 \frac{\text{об}}{\text{с}}$ , что соответствует частоте поля  $f_{\Pi} = 2,083\text{Гц}$  при нулевой скорости ротора двигателя. Тогда нижний предел задания частоты электропривода должен быть не более  $f = 0,25\text{Гц}$ . Это позволяет регулировать момент от 12 до 200% на ползучей или нулевой скорости ротора. Известно, что при переходе во вторую зону регулирования ( $f > 50\text{Гц}$ ) электромагнитный момент значительно падает при росте частоты привода, поэтому область при  $f > 50\text{Гц}$  в предлагаемом методе не рассматривается.

Используемый микропроцессорный блок управления в течение  $\approx 1\mu\text{с}$  параллельно во времени выдает команду по 12-и входам трёхканального инвертора на включение или выключение IGBT – транзисторов. Поэтому предварительно в ПЗУ микропроцессора в режиме параметризации вводятся одномерный и двумерный массивы данных длительностей тактовых  $\Delta t(f)$  и рабочих  $\Delta\tau(f, k)$  импульсов. Алгоритм расчёта тактового и рабочего импульсов приведен в [2].

Длительность рабочего импульса корректируется посредством коэффициента  $\varepsilon(f) \leq 1$ , показанного на рис.8.

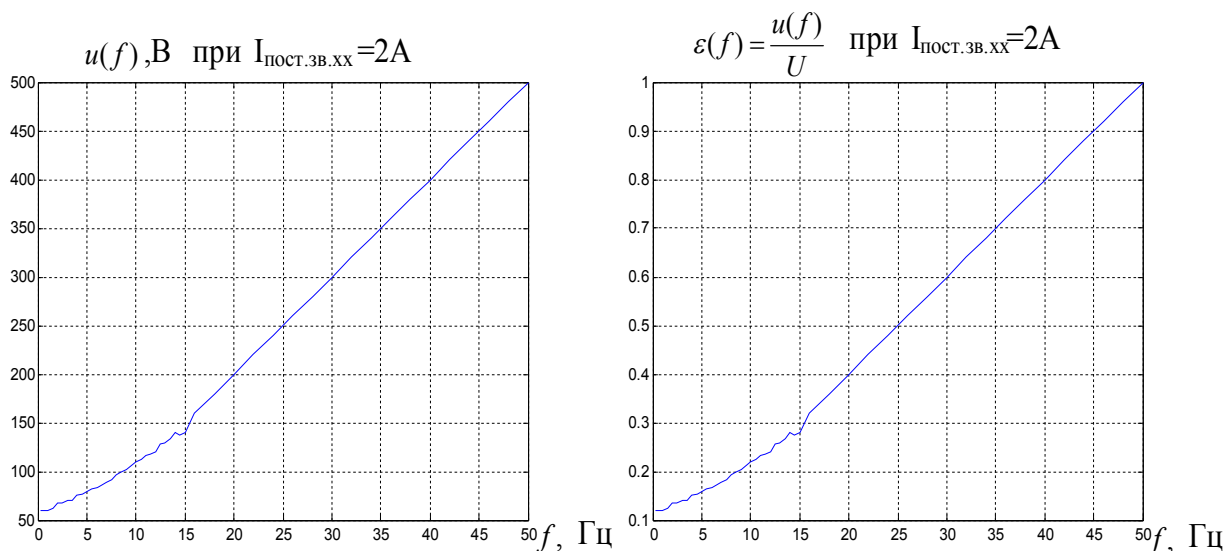


Рисунок 8 – Экспериментальная зависимость амплитуды  $u(f)$  напряжения синусоиды от частоты  $f$  и её относительная величина  $\varepsilon(f) \leq 1$  для асинхронного электропривода

Указанная корректировка в рабочем диапазоне частоты  $f$  выполняется при холостом вращении ротора двигателя и фиксации силы тока постоянного звена на уровне двойного номинального тока фазы двигателя. Интегральный ток постоянного звена от трех фаз двигателя на уровне его двойного номинала обеспечивает номинальный ток в каждой фазе машины. Экспериментальная зависимость коэффициента  $\varepsilon(f) \leq 1$  от частоты  $f$  проводилась при силе тока постоянного звена, равного 2А, и холостом ходе двигателя. Текущее напряжение  $u(f)$  регулировали с помощью автотрансформатора (латра). Верхняя часть полученного графика экстраполировалась по причине использования однофазного латра.

Алгоритм управления силовыми ключами трёхканального ШИМ-а инвертора асинхронного электропривода приведен в [2]. Алгоритмы формирования токов каждой фазы одинаковы, они отличаются только изменением начала и конца кода тактовых импульсов, что рассматривалось ранее. Симуляция работы трёхканального ШИМ-а представлена на рис. 9. Это практически соответствует осциллограммам токов фаз на активной нагрузке. В связи с тем, что в однофазном инверторе одновременно включаются два силовых ключа, стоящие по диагоналям моста, из микропроцессора выводятся одинаковые пары сигналов на два буфера по шесть выходов на буфер (А+, А-, В+, В-, С+, С-), что отражено на рисунках 9, 1, 2. Важно то, что при переключении инвертора с «плюсовой» на «минусовую» диагональ моста, короткое замыкание силовых ключей по вертикали моста отсутствует при большой паузе этого перехода по отношению к времени выключения IGBT-транзистора, что также видно на рисунке 9.

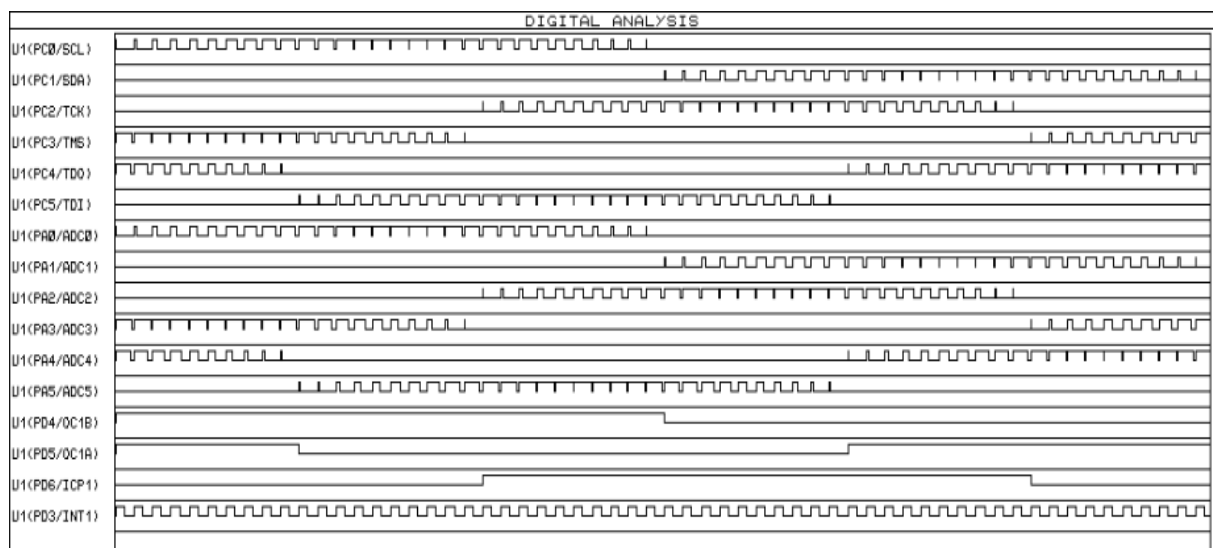


Рисунок 9 – Симуляция работы ШИМ-а при  $f = 20\text{Гц}$ ,  $i = 5$ ,  $n = 60$ ,  $\varepsilon(f) = 1$

Практика показала, что на токовых осциллограммах трёх фаз двигателя присутствуют слабозаметные всплески, которые внешне не проявляются на работе привода и не влияют на блок управления. Привод легко управляем и быстро реагирует на изменение задания частоты. Эксперимент показал, что для выбранного двигателя рабочий диапазон частот  $f = 0,25 \dots 50\text{Гц}$ . При использовании барабанного фрикционного тормоза и силе тока постоянного звена около двух ампер на холостом ходе электродвигателя, этот ток при появлении нагрузки на валу двигателя не увеличивается, он даже уменьшается на 10-20%, что положительно влияет на динамику привода. При этом привод работает устойчиво во всём диапазоне  $f$ . Если сила тока постоянного звена не больше ампера при уменьшенном напряжении  $u(f)$  на холостом ходе двигателя, то этот ток при появлении нагрузки на валу



двигателя увеличивается на 10-20%, а скорость вращения ротора значительно падает вплоть до его остановки. Таким образом, с помощью упрощённых аппаратных средств и простого математического обеспечения получен положительный результат по данному регулируемому линейному асинхронному электроприводу. В следующей статье будет рассмотрено исследование электропривода с измерением электромагнитного момента на стенде механически связанных асинхронного и постоянного тока электродвигателей, фрикционного тормоза и тормоза, оснащенного динамометром.

#### **Выводы**

1. Разработан лабораторный стенд регулируемого линейного асинхронного электропривода на основе измерения, а не вычисления электромагнитного момента, что позволяет значительно упростить модель управления асинхронной машиной.

2. В разработанном преобразователе частоты отсутствует как таковая математическая модель управления асинхронным двигателем, определяющая состояние объекта, что по отношению к существующим преобразователям, коренным образом упрощает предлагаемый электропривод. Стандартное математическое управление относится только к широтно-импульсному модулятору инвертора, которое заключается в формировании синусоидальных фазных токов и функции напряжения от частоты.

3. В разработанном регулируемом электроприводе реализовано вращающееся магнитное поле, амплитуда и форма которого остаются неизменными, а изменяется только частота вращения этого поля. Выше сказанное делает его полным аналогом электропривода постоянного тока. Поэтому он имеет широкую область использования: тяжело-нагруженный электропривод в прокатном производстве; перемешивание жидкого металла в кристаллизаторе; электропривод электромобиля, бытовая техника, в которой используется асинхронный двигатель.

4. Разработанный электропривод является энергосберегающим, так как несущая частота используемого широтно-импульсного модулятора не превышает одного килогерца в рабочем диапазоне частоты инвертора, что ниже в разы по отношению к существующим аналогам.

#### **Список использованной литературы**

1. Лінійний асинхронний регульований електропривод: патент на винахід № 92712 / Жукова Н.В., Литвинов В.І. и др.
2. Лінійний асинхронний регульований електропривод: заявка на винахід № a201206027 от 18.05.2012 / Жукова Н.В., Литвинов В.І., Голиков В.В.
3. Жукова Н.В. Асинхронный регулируемый электропривод на основе его линейной модели / Н.В. Жукова // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Електротехніка та енергетика». – 2011. – Випуск 11(186). – С. 125 – 132.
4. Копылов И.П. Электрические машины: учеб. для вузов / И.П. Копылов. - [4-е изд., испр.]. - М.: Высш. шк., 2004. – 607 с.
5. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов / И.П. Копылов. - [3-е изд., испр.]. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.

Надійшла до редакції:  
28.02.2013

Рецензент:  
д-р 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. Лінійний асинхронний регульований електропривод 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, але з можливістю зміни його частоти обертання. 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.

**Ключові слова:** мікропроцесорний блок керування, драйвер, силові ключі, інвертор, широтно-імпульсний модулятор, алгоритм управління.

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

**Donetsk National Technical University**

**Laboratory Bench of Controlled Linear Asynchronous Electric Drive.** Linear asynchronous electric drive is designed as a laboratory bench. For realization of the laboratory bench, the authors developed basic blocks of frequency converter:

1. Microprocessor control unit of electric drive.
2. Power key drivers block of three independent inverters for each phase of electric drive.
3. The power unit consisting of a rectifier and three-channel inverter, each channel contains four power keys.
4. Measurement unit of phase currents and rectifier current based on the Hall current sensors.
5. Power supply with the necessary number of galvanic isolation.

To control asynchronous electric drive the authors have developed:

1. The algorithm for calculating the duration of the clock pulse  $\Delta t$  and working pulse  $\Delta \tau$  of a pulse-width modulator, the arrays are placed in microprocessor read-only memory (ROM).
2. The control algorithm for three-channel inverter power keys of asynchronous electric drive.

The proposed technical solution forms the resulting rotating magnetic field of the stator and rotor with constant amplitude and configuration, but providing the ability of its speed change. 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.

The continuously rotating magnetic field of asynchronous machine is realized through the use of a single-phase inverter consisting of four power keys for each of the phase winding and the development of PWM mathematical software, providing the formation of sinusoidal currents with constant amplitude at different frequencies  $f$  on the windings. The number of segments  $n$  which divide the sinusoid is multiple of 12, that is  $n = 12 \cdot i$ . Here  $i$  is integer, its choice depends on the invariance condition of a clock pulse length

$$\Delta t = \frac{1}{f \cdot 12 \cdot i} \approx \text{const}$$
 in a given frequency range  $f$ ,  $i = \text{Integer part} \left[ \frac{100}{f} \right]$ . In the considered frequency range  $f = 0.25 \dots 50$  Hz the value of a clock pulse is  $\Delta t = 1 \pm 0.2 \text{ms} \approx \text{const}$ .

Realization of the rotating magnetic field of the machine allows to measure the electromagnetic torque, but not to calculate, as this is done in existing analogs of the frequency inverters with vector control and direct control of torque. Electromagnetic torque is measured by means of the  $\dot{I}_{et} = cS$  on the linear part of asynchronous electric drive stationary mechanical characteristic in proposed technical decision. The above makes it a complete analog of DC electric drive. Therefore, it has a wide area of use: hard-loaded electric drive is in rolling mill, mixing of the liquid metal in the crystallizer, electromobile electric drive, home appliances, which use asynchronous motor.

Developed electric drive is energy-saving, because the carrier frequency used by the pulse width modulator is less than one kilohertz in a working range of frequency inverter that is lower by times as compared with existing analogues.

**Keywords:** microprocessor control unit, driver, power keys, inverter, pulse-width modulator, control algorithm.