

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ПЧ-АД

А.Л. Андронов (г. Барнаул, Россия)

С учетом современного подхода к энергосбережению в системах вентиляции и водоснабжения (вентиляторы, компрессоры, насосы и т.п.) следует повсеместно использовать электронные преобразователи частоты. Система преобразователь частоты – короткозамкнутый асинхронный электродвигатель (ПЧ-АД) – эффективное средство энерго- и ресурсосбережения, обеспечивающее существенную экономию – до 50% электроэнергии и до 20% воды и тепла, и служащее основой для построения оптимальных технологических систем воздухо-, водо- и тепло-снабжения в различных областях [1, 2, 3, 4].

Среди множества вопросов, возникающих при исследовании системы ПЧ-АД особенно важным и довольно сложным является анализ электромагнитных процессов, протекающих в АД и ПЧ.

Анализ этих электромагнитных процессов можно вести различным образом: методом отдельных составляющих, операторным методом, методом разностных уравнений, переменных состояний, с помощью комплексного исчисления, с помощью ортогональных рядов Фурье, а также методом математического моделирования.

Математическая модель ПЧ-АД предполагает возможность проведения исследований по широкому кругу вопросов. В ее основе лежит расчет мгновенных значений токов и напряжений на всех участках и элементах исследуемого устройства. Именно с помощью математических моделей можно воспроизвести любые условия, как, например, номинальный режим, переходные и аварийные процессы и пр. На основе полученных массивов мгновенных значений можно в дальнейшем проводить расчеты действующих и средних значений величин токов и напряжений, энергетические характеристики и гармонический анализ.

Для исследования электромагнитных процессов в системе ПЧ-АД удобно использовать методику, основанную на моделировании режимов работы исследуемой системы на ЭВМ [5]. Результатом моделирования ПЧ-АД с помощью разработанной модели являются осциллограммы скорости вращения и электромагнитного момента АД, фазных напряжений, токов, потокосцеплений двигателя, а также фазных напряжений и токов транс-

форматора, питающего систему ПЧ-АД. Моделирование системы ПЧ-АД в пакете Matlab 6.0 приложения Simulink 4.0 [5, 6] проводилось для АД типа АИР80А2У3 номинальной мощностью 1,5 кВт. В качестве нагрузки двигателя был выбран центробежный насос, механическая характеристика которого в относительных единицах определяется по формуле:

$$M = 0,5 + 0,95\omega^2$$

с учетом того, что момент трения

$$M_{тр} = 0,05M_n.$$

Механическая характеристика центробежного насоса приведена на рисунке 1.

Для оптимизация алгоритма широтно-импульсной модуляции (ШИМ) рассмотрим принцип формирования напряжения на базе транзисторного автономного инвертора напряжения.

ШИМ – управление силовыми ключами (транзисторами) трехфазного автономного инвертора напряжения (АИН) обеспечивает регулирование величины и формирование квазисинусоидальной кривой выходного напряжения при неизменном значении входного напряжения ( $U_d = \text{const}$ ). При этом обеспечивается заданное соотношение напряжение (частота ( $U/f$ )) во всем диапазоне регулирования.

Алгоритм ШИМ – управления задает последовательность, фазу и длительность включения всех шести транзисторов АИН. Схема транзисторного АИН с подключенными к его выходу обмотками двигателя показана на рисунке 2.

Значение выходного напряжения АИН в каждый момент времени определяется состоянием транзисторных ключей всех трех фаз.

Основополагающие принципы управления и работы трехфазного мостового АИН сводятся к следующему:

- два ключа одной фазы АИН включаются поочередно, т. е. интервал проводимости каждого ключа в течение периода выходной частоты составляет  $\pi$  рад. Одновременное включение двух ключей одной фазы недопустимо, т.к. приводит к короткому замыканию источника  $U_d$ ;

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ПЧ-АД

- ключи соседних фаз работают аналогично со сдвигом на  $2\pi/3$  рад.;

- одновременно в каждый момент времени в состоянии проводимости находятся три ключа — по одному в каждой фазе. За счет этого в каждый момент времени все фазы нагрузки подключены к полюсам источника питания  $U_d$  и существует цепь для протекания тока (через транзисторы либо обратные диоды).

Условно обозначим состояние ключей фазы:

A (B, C)=1 – когда включен верхний ключ (A+, B+, C+);

A (B, C)=0 – когда включен нижний ключ (A-, B-, C-).

В трехфазном мостовом АИН возможны восемь комбинаций состояний ключей (из шести по три):

Шесть «рабочих» комбинаций 001, 010, 011, 100, 101, 110 обеспечивают подключение фаз нагрузки к источнику  $U_d$ . Схема, соответствующая комбинации 010, в качестве примера показана на рисунке 3. Ко всем трем фазам нагрузки приложено напряжение.

Две «нулевых» комбинации 000 и 111 обеспечивают отключение фаз нагрузки от источника  $U_d$  и их закорачивание на одном из полюсов источника (схема для комбинации 111 показана на рисунке 4). Напряжение на всех трех фазах нагрузки равно нулю.

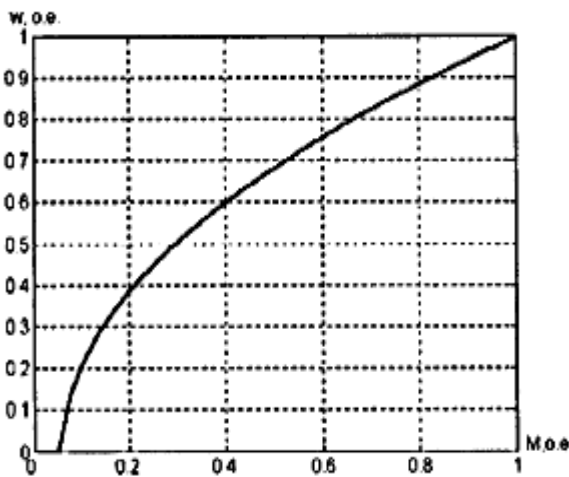


Рисунок 1 – Механическая характеристика центробежного насоса в о.е.

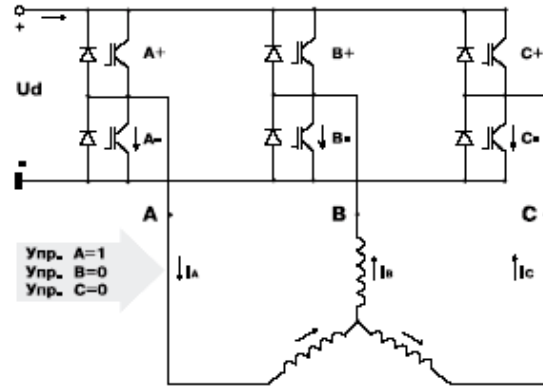


Рисунок 2 - Схема транзисторного АИН с подключенными к его выходу обмотками двигателя

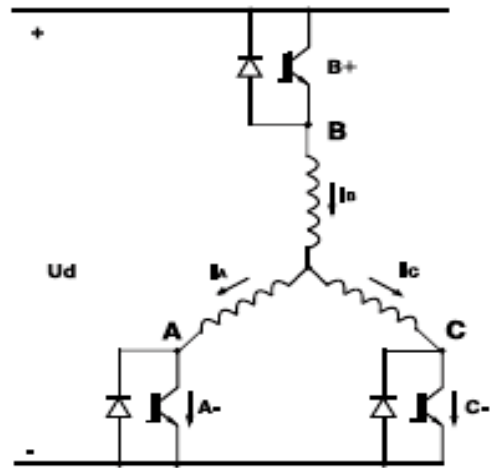


Рисунок 3 – Схема подключения фаз (010)

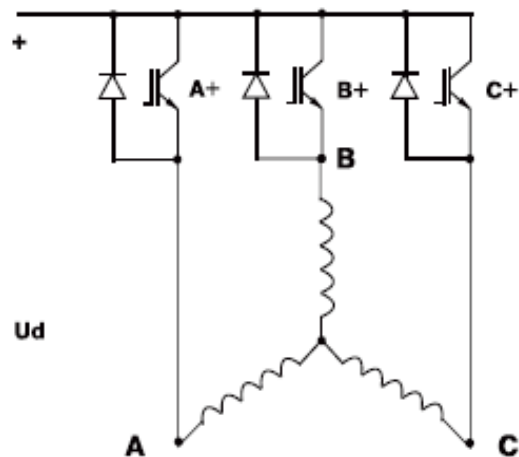


Рисунок 4 – Схема подключения фаз (011)

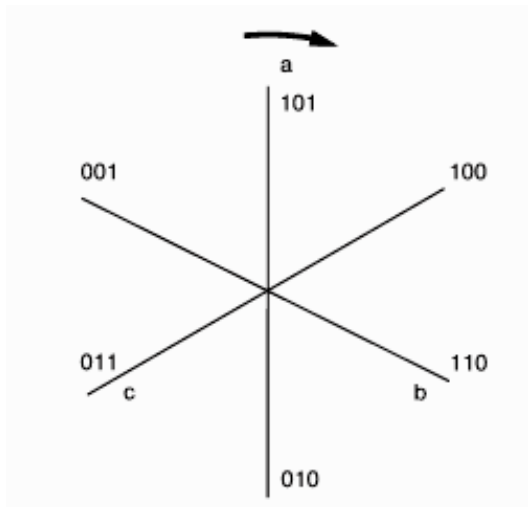


Рисунок 5 – Диаграмма напряжений

Соответствие комбинаций вентилях АИН и значений фазных и линейных напряжений нагрузки (относительно  $U_d$ ) иллюстрирует диаграмма (рисунке 5).

Задача оптимизации алгоритма ШИМ – управления АИН электроприводов заключается в определении числа, последовательности, временных и фазовых параметров различных рабочих и нулевых комбинаций ключей в течение периода выходной частоты с целью:

- получения полного от нуля до номинального значения диапазона регулирования выходного напряжения;
- максимального использования напряжения входного источника  $U_d$ ;
- формирования прямоугольно (импульсной кривой выходного напряжения с гармоническим составом, обеспечивающим практически синусоидальную форму кривой тока нагрузки (двигателя);
- минимизации мощности потерь переключения силовых транзисторов АИН, пропорциональной числу переключений, т. е. частоте ШИМ. Два последних требования противоречат друг другу и требуют компромиссного решения.

Каждой из шести рабочих комбинаций ключей АИН соответствует определенное положение вектора на плоскости фаз нагрузки (рисунок 5). Нулевые комбинации ключей обращают вектор в ноль.

Эти шесть рабочих комбинаций позволили получить дискретный ряд частот: 10,0; 16,7; 20,0; 25,0; 33,3 и 42,9 Гц. Эти ступени частоты выходного ШИМ формируют симметричную систему выходного напряжения.

В результате моделирования были получены зависимости фазных токов и напряжений АД, графики которых для установившегося режима работы приведены на рисунках 6-11.

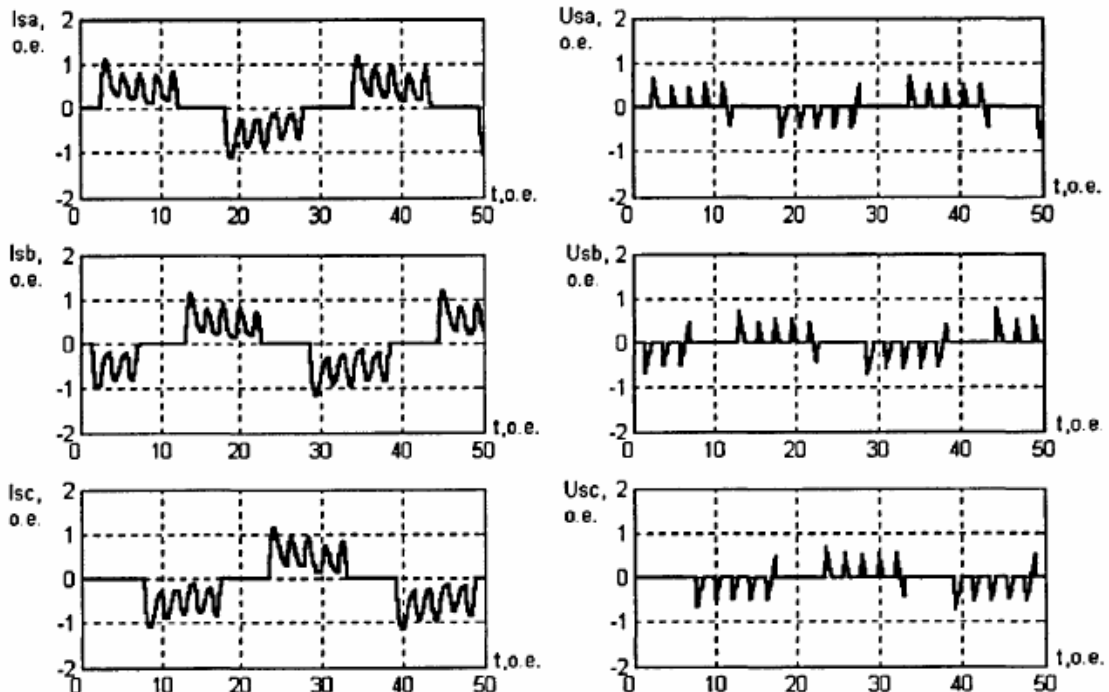


Рисунок 6 – Графики тока и напряжения фаз А, В, С и статора АД в установившемся режиме работы системы ПЧ-АД при частоте 10,0 Гц

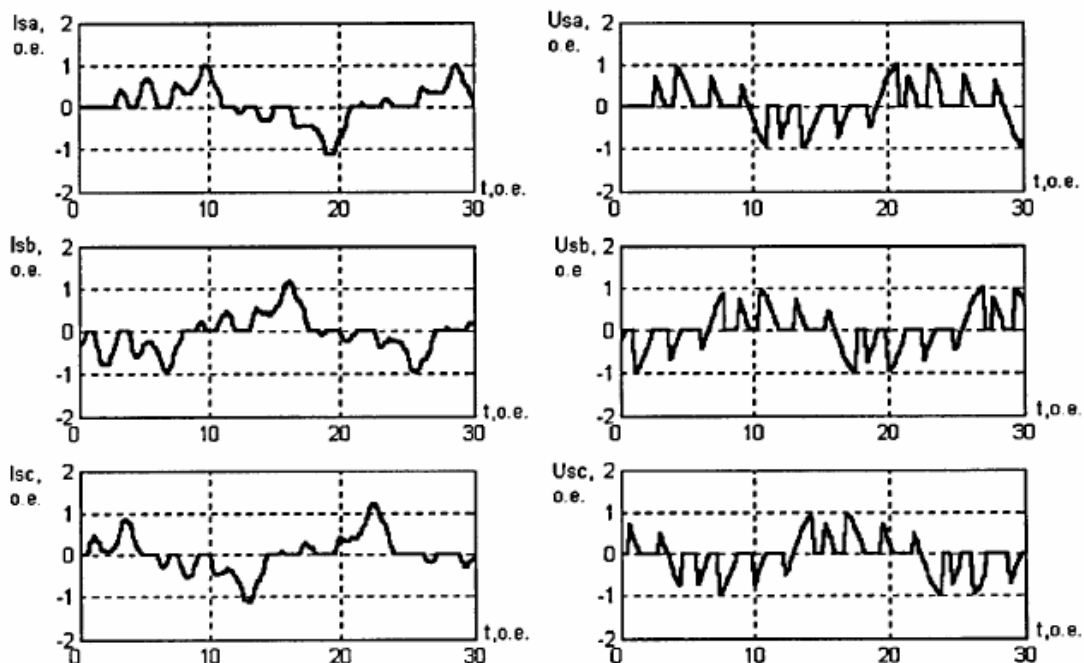


Рисунок 7 – Графики тока и напряжения фаз А, В, С и статора АД в установившемся режиме работы системы ПЧ-АД при частоте 16,7 Гц

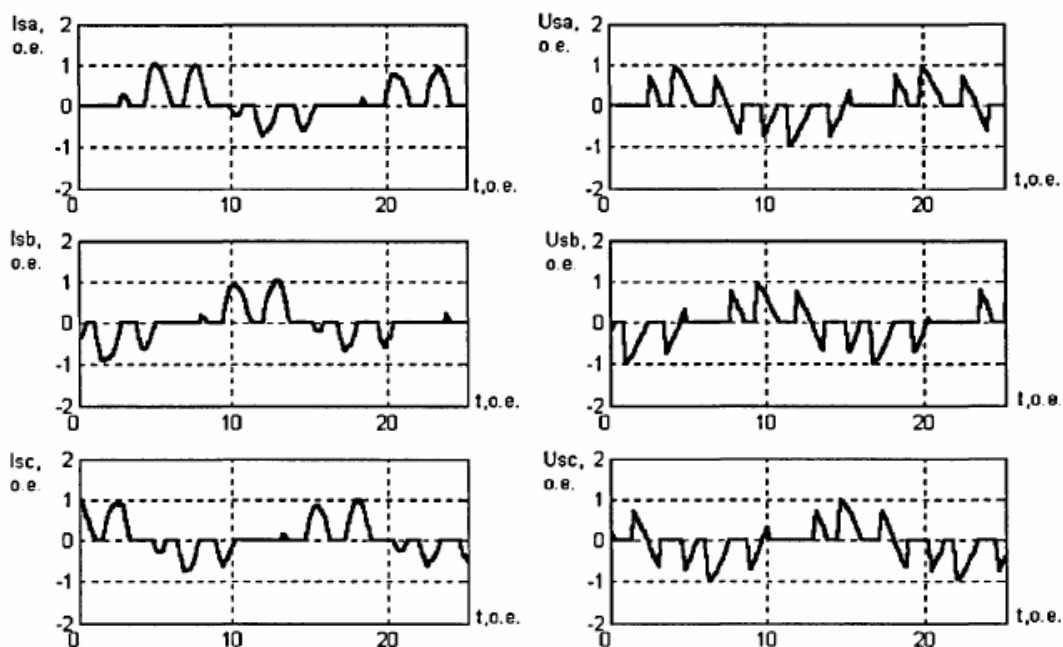


Рисунок 8 – Графики тока и напряжения фаз А, В, С и статора АД в установившемся режиме работы системы ПЧ-АД при частоте 20,0 Гц

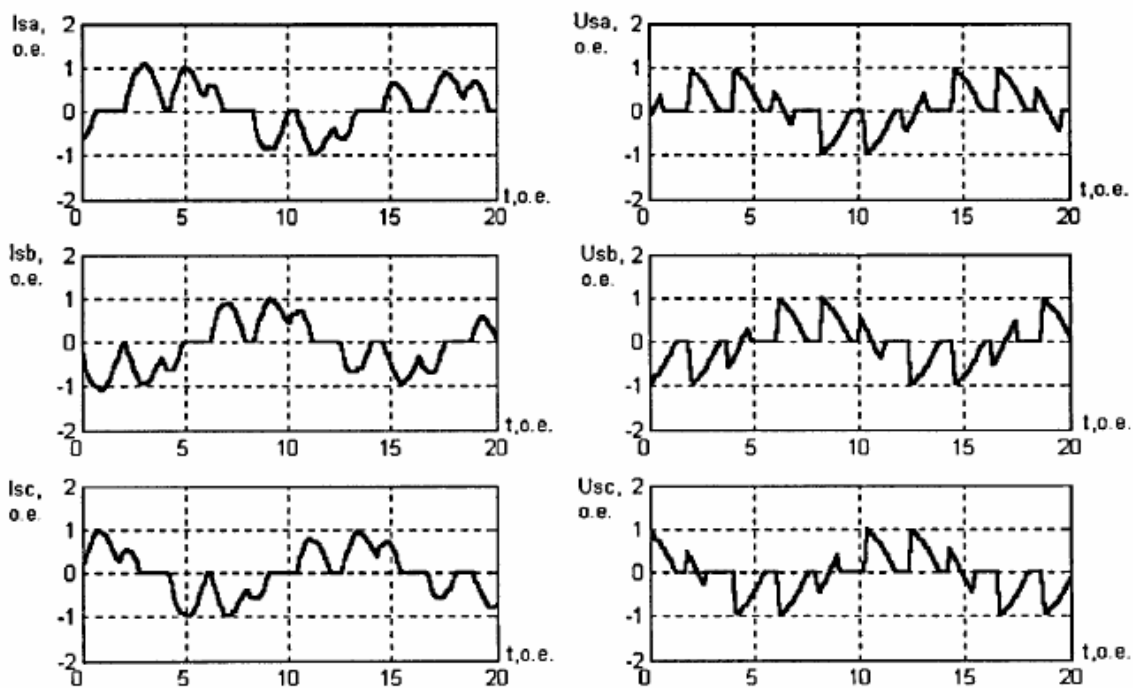


Рисунок 9 – Графики тока и напряжения фаз А, В, С и статора АД в установившемся режиме работы системы ПЧ-АД при частоте 25,0 Гц

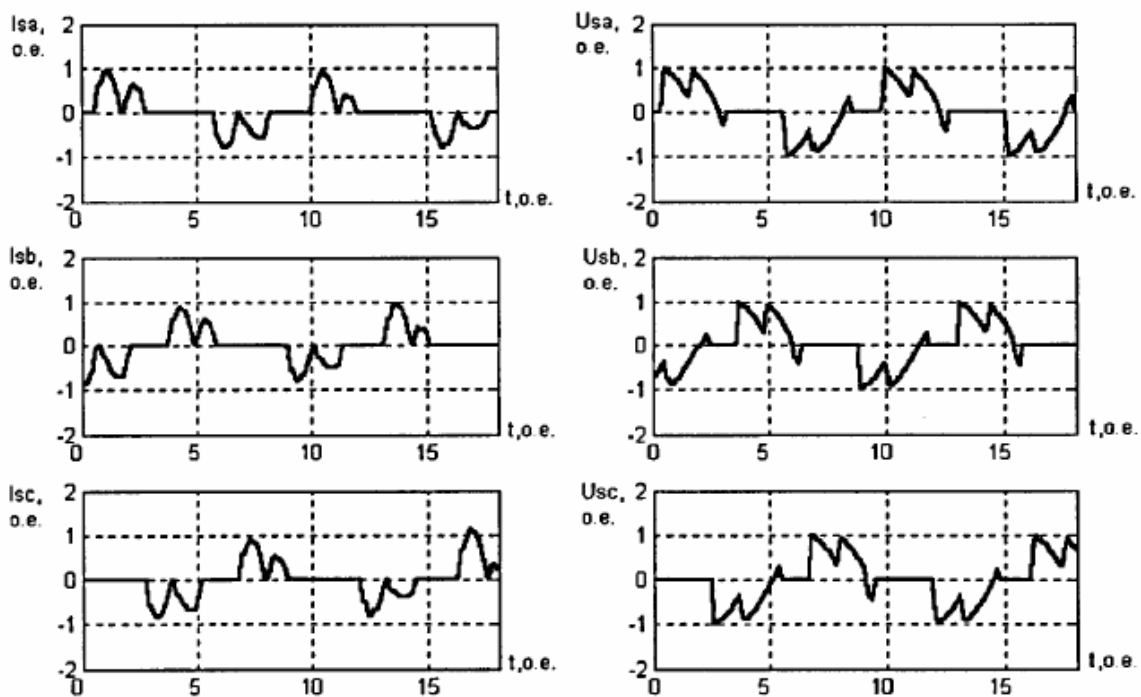


Рисунок 10 – Графики тока и напряжения фаз А, В, С и статора АД в установившемся режиме работы системы ПЧ-АД при частоте 33,3 Гц

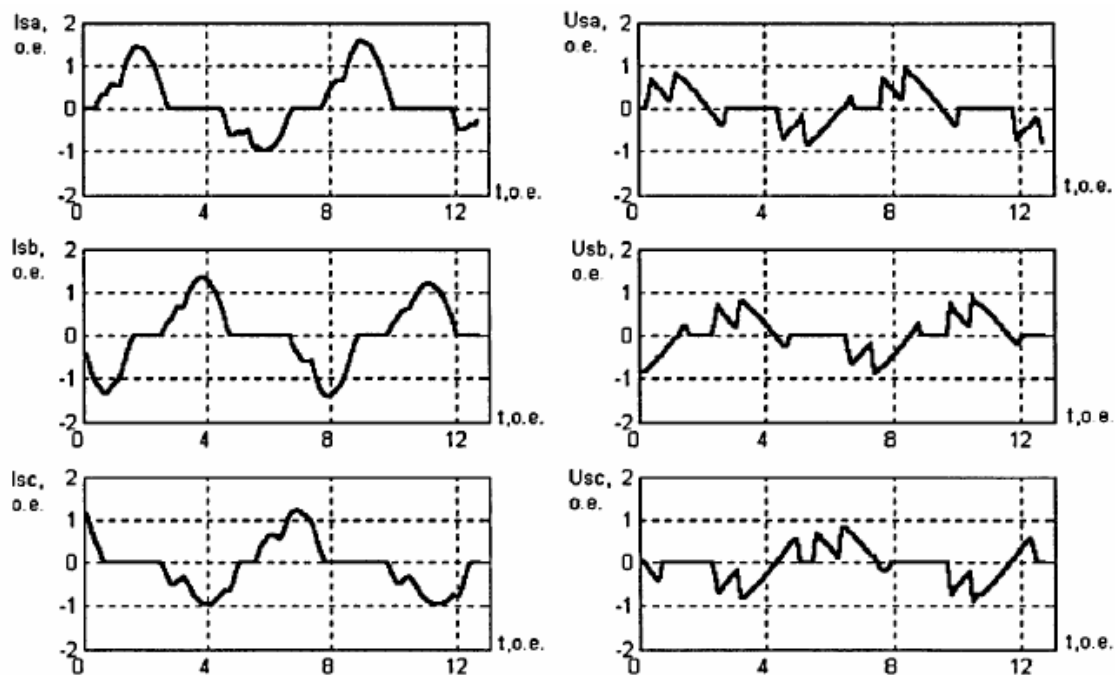


Рисунок 11 – Графики тока и напряжения фаз А, В, С и статора АД в установившемся режиме работы системы ПЧ-АД при частоте 42,9 Гц

Моделирование показало, что система ПЧ-АД с программным формированием симметричной системы выходного напряжения ШИМ устойчиво работает на всех дискретных ступенях частоты (10,0; 16,7; 20,0; 25,0; 33,3 и 42,9 Гц).

Как показало моделирование, в установившихся режимах работы, форма выходного напряжения ПЧ и тока АД менялась незначительно в зависимости от мощности АД. При этом для всего ряда моделируемых АД (от 1,5 до 55 кВт) отсутствовала колебательность частоты вращения ротора во всем диапазоне изменения частоты питающего напряжения.

Таким образом, моделирование установившихся режимов работы системы ПЧ-АД, показало инвариантность разработанного алгоритма программного формирования ШИМ – управления напряжением ПЧ к типу АД.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Материалы НПК «Межрегиональная научно-практическая конференция по приме-

нению энергосберегающего частотно-регулируемого электропривода во всех отраслях производства и в коммунальном хозяйстве». – Новоуральск. 22-25 января 2002. – Екатеринбург: Сократ. – 2002. – 267 с.

2. Сарач Б.М. Энергосберегающая насосная станция (опыт практической реализации) // Вестник МЭИ. – 1995. – № 1. – С. 82-87.

3. Сарач Б.М., Бастунский А.М. Заводские и натурные испытания насосных агрегатов с преобразователями частоты // Электротехника. – 1995. – №7. – С. 19-20.

4. Сарач Б.М., Хромых И.Е. Опыт внедрения энергосберегающих насосных станций // Промышленная энергетика. – 1997. – № 8. – С. 22-25.

5. Дьяконов В. Matlab 6: Учебный курс – СПб.: Питер, 2001. – 592 с.

6. Дьяконов В. Simulink 4. Специальный справочник – СПб.: Питер, 2002. – 528 с.