

Н.В. Чуприна, С.В. Седых, А.А. Пугачев  
(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

## **СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ ИНВЕРТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

COMPARATIVE ASSESSMENT OF ENERGY EFFICIENCY OF CONTROL SYSTEMS  
OF AUTONOMOUS VOLTAGE INVERTER IN THE COMPOSITION  
OF AC ELECTRIC DRIVE

*Приведены основные энергетические показатели автономного инвертора напряжения в составе электропривода переменного тока при различных системах управления инвертором. Получены зависимости коэффициента гармонических искажений тока и напряжения от различных электрических параметров.*

*The main energy indicators of an autonomous voltage inverter as part of an AC drive with various inverter control systems are presented. The dependences of the harmonic distortion coefficient of current and voltage on various electrical parameters are obtained.*

*Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, электропривод, энергоэффективность, потери, мощность, энергия, автономный инвертор напряжения, коэффициент гармонических искажений, широтно-импульсная модуляция, пространственно-векторная модуляция.*

*Keywords: asynchronous electric motor, electric drive, energy efficiency, losses, power, energy, autonomous voltage inverter, harmonic distortion, pulse-width modulation, space-vector modulation.*

Автономные инверторы напряжения (АИН) получили наиболее широкое распространение из всех типов автономных инверторов. Данный тип автономных инверторов считается самым универсальным на данный момент преобразователем. Автономный инвертор напряжения кроме преобразования постоянного напряжения в переменное, может работать в режиме выпрямителя, т.е. преобразовывать переменное напряжение в постоянное. На основе АИН выполняется большое количество электротехнических устройств (активные фильтры, рекуператоры электрической энергии, выпрямители, преобразователи частоты) [1, 2, 3, 4].

В электроприводе для автономных инверторов, наибольшее распространение получили три типа управления АИН [1, 2]:

1. широтно-импульсное регулирование (ШИР);
2. широтно-импульсная модуляция (ШИМ);
3. пространственно-векторная модуляция (ПВМ).

В ШИР формирование выходного напряжения АИН происходит за счет

импульсов с определенной частотой, амплитудой и длительностью. Частота, амплитуда и длительность импульсов не измена во времени.

В ШИМ формирование выходного напряжения АИН выполняется по квазисинусоидальному закону. Напряжение на выходе формируется за счет импульсов, длительность которых переменна во времени.

В ПВМ модуляции формирование напряжения происходит за счет формирования пространственного вектора напряжения, который получается путем сложения ненулевых и нулевых базовых векторов.

Наибольшее распространение, в настоящий момент, получила конфигурация электропривода, состоящая из преобразователя частоты с векторным или скалярным управлением двигателем и ШИМ или ПВМ автономного инвертора напряжения, входящего в состав силового канала преобразователя частоты.

ПВМ осуществляется путем вращения опорного вектора вокруг диаграммы состояний, которая состоит из шести основных ненулевых векторов, образующих шестиугольник (вектора  $U_1-U_6$ ) (рис. 1).

У трехфазного двухуровневого инвертора возможно 8 состояний, при этом инвертор может сформироваться 8 базовых векторов ПВМ ( $U_0-U_7$ ). Как видно из рис. 5.23 все пространство разделено на шесть одинаковых секторов по  $60^\circ$ . Каждый сектор ограничен двумя активными векторами. Два вектора с нулевой амплитудой расположены в центре ( $U_0, U_7$ ) [1, 3, 4]. Базовые вектора на фазовой диаграмме задаются выражениями:

$$U_k = \begin{cases} \frac{2}{3} \cdot U_d \cdot e^{j \cdot (k-1) \cdot \frac{\pi}{3}}, & \text{если } k = 1, 2, 3, 4, 5, 6, \\ 0, & \text{если } k = 0, 7 \end{cases}$$

где:  $U_k$  – вектор на фазовой диаграмме;  
 $k$  – номер вектора на фазовой диаграмме.

Одним из параметров, используемых в сравнительных оценках различных систем электропривода, является коэффициент гармонических искажений (КГИ). КГИ возможно выразить следующим образом [26]:

$$\text{КГИ} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} I_i^2}}{I_1}$$

где:  $I_i$  – амплитуда  $i$ -ой гармоники, кроме несущей гармоники (1-ой);  
 $I_1$  – амплитуда несущей гармоники.

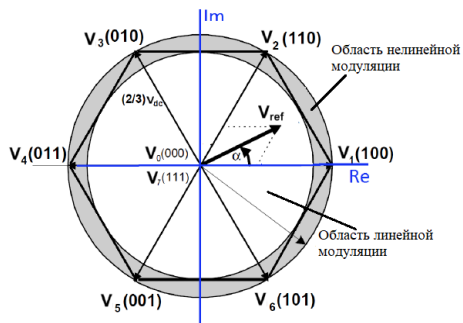


Рис. 1. Области линейной и нелинейной модуляции

Соотношение между опорным вектором напряжения  $U_{оп}$  и значением пика прямоугольной волны ( $2U_d/\pi$ ) называется индексом модуляции ( $\mu$ ). В линейной области индекс модуляции может быть выражен следующим образом:

$$\mu = \frac{U_{оп}}{U_{max-sixstep}}$$

Так как максимальное значение вектора опорного напряжения равно радиусу вписанной окружности в шестиугольник, тогда:

$$U_{оп} = \frac{2}{3} \cdot U_d \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}\right);$$

$$\mu = \frac{\frac{2}{3} \cdot U_d \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}\right)}{\frac{2}{\pi} \cdot U_d} = 0,907.$$

Математическое моделирование проводилось с помощью программного комплекса *MatLab/Simulink*. На рис. 2 (а) и (б) – представлены зависимости *КГИ* тока фазы А статора от частоты коммутации ключей  $f_k$  при различных моментах нагрузки на двигателе, при использовании АИН с ШИМ и АИН С ПВМ, (в) и (д) – зависимости *КГИ* напряжения фазы А статора от индекса модуляции  $\mu$ , при использовании АИН с ШИМ и АИН С ПВМ.

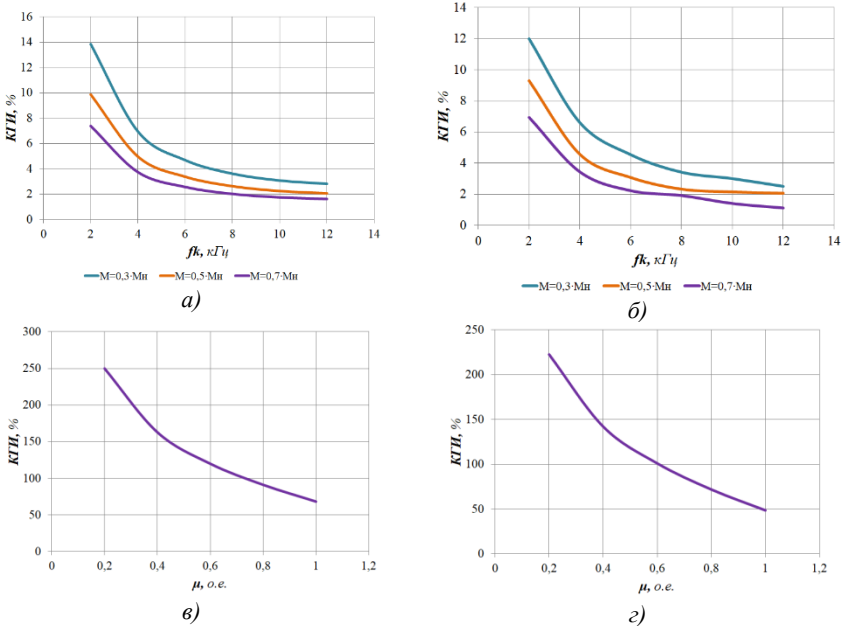


Рис. 2. (а) – зависимость *КГИ* тока от  $f_k$ , при использовании АИН с ШИМ (б) – зависимость *КГИ* тока от  $f_k$ , при использовании АИН с ПВМ, (в) – зависимость *КГИ* тока от  $\mu$ , при использовании АИН с ШИМ (г) – зависимость *КГИ* тока от  $\mu$ , при использовании АИН с ПВМ

Данные результаты получены для математической модели электропривода с векторным управлением асинхронным двигателем типоразмером 4А112М4У3 номинальной мощностью 5,5 кВт.

Как видно из зависимостей *КГИ* тока фазы А статора от частоты коммутации ключей  $f_k$  при различных моментах нагрузки (рис. 2 (а) и (б)), при увеличении частоты коммутации транзисторных ключей происходит уменьшение гармонических искажений. Относительное значение *КГИ* у АИН с ПВМ в среднем на 9% меньше чем у АИН с ШИМ. Наибольшая разница *КГИ* составляет 1,85% и получается при моменте  $M=0,3 \cdot M_n$ .

Как видно из зависимости *КГИ* напряжения фаза А от индекса модуляции  $\mu$  (рис. 2 (в) и (г)) с уменьшением индекса модуляции происходит возрастание *КГИ*, для АИН с ШИМ в диапазоне от 68,31% (соответствует  $\mu=1$  о.е.) до 249,22% (соответствует  $\mu=0,2$  о.е.) (рис. (в)), а для АИН с ПВМ в диапазоне от 48,49% (соответствует  $\mu=1$  о.е.) до 222,69% (соответствует  $\mu=0,2$  о.е.) (рис. 2 (г)). Относительное значение *КГИ* у АИН с ПВМ в среднем на 20% меньше чем у АИН с ШИМ.

Были получены зависимости потерь мощности двигателя  $\Delta P_{\text{ов}}$  от момента нагрузки двигателя  $M$  при использовании в силовом канале АИН с ШИМ и АИН с ПВМ. Потери мощности в двигателе при использовании АИН с ПВМ в среднем всегда меньше чем при использовании АИН с ШИМ. Например, при  $w=w_n$  и моменте нагрузке на валу двигателя равным  $M=M_n$  потери мощности в двигателе при АИН с ШИМ составляют 840 кВт а при использовании АИН с ПВМ потери в двигателе составляют 580 кВт.

### Список литературы

1. Гельман, М. В. Преобразовательная техника: учеб. пособие / М. В. Гельман, М. М. Дудкин, К. А. Преображенский. - Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.
2. Томашевский, Д. Н. Автономные инверторы: учеб. пособие / Д. Н. Томашевский. - Екатеринбург: Издательство Урал. ун-та, 2019 – 120 с.
3. Three-Level NPC Inverter Based SVM-VCIMD with Feed-forward Active PFC Rectifier for Enhanced AC Mains Power Quality [Текст] / Sandeep Madishetti, Bhim Singh, G. Bhuvaneswari // IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 4, 2015.
4. Analysis, Simulation and Implementation of Space Vector Pulse Width Modulation Inverter [Текст] / E. Hendawi, F. Khater and A. Shaltout // Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on APPLICATIONS of ELECTRICAL ENGINEERING, pp. 124-131.

*Материал поступил в редколлегию 20.10.20.*