

# Анализ энергетических показателей и методика выбора оптимальных алгоритмов ШИМ для управления 3-фазным инвертором напряжения

А.Б. Виноградов, Д.Б. Изосимов

## Введение

Вопросам построения энергетически эффективных ШИМ для управления трехфазным инвертором напряжения (рис.1) было посвящено довольно много работ, среди которых работы [1–7]. В частности в [1] был раскрыт механизм построения энергетически эффективных алгоритмов управления инвертором, проведено сравнение характеристик «треугольного» и «шестиугольного» алгоритмов ШИМ. Первый формируется в каждом цикле модуляции из двух значащих и двух нулевых образующих векторов сектора векторной диаграммы напряжений инвертора (рис.2), в котором находится вектор эквивалентного напряжения  $\vec{U}_{экв}$ , второй формируется из шести значащих векторов напряжения без использования нулевых векторов. В [3] представлен метод пространственно-векторного формирования энергетически эффективного алгоритма ШИМ с жестким законом коммутации, реализованный в цифровой системе управления. В [4] был предложен критерий для сравнения энергетических показателей различных алгоритмов ШИМ, формируемых как в рамках жесткого закона коммутации, так и в замкнутом релейном контуре, проведено сравнение различных вариантов формирования ШИМ в замкнутом контуре тока в ряде рабочих режимов. Критерий представляет собой произведение усредненных на большом интервале измерения частоты переключений и величины коммутационных пульсаций тока. Недостатком этого критерия является то, что учет потерь в преобразователе и двигателе осуществляется совокупно, без четкого разграничения их весовых коэффициентов и отсутствия непосредственной связи критерия с каким-либо видом дополнительных коммутационных потерь в системе «преобразователь - двигатель». В [5] предложен критерий и осуществлено сравнение энергетических показателей для трех наиболее эффективных с энергетической точки зрения законов коммутации, использующих нулевое состояние инвертора и обеспечивающих минимизацию переключений в периоде модуляции при симметрии управления фазами. Сравнение выполнено по критерию

$$J = \frac{1}{T_k} \int_0^{T_k} N[\Delta I(t)]^2 dt ,$$

где  $T_k$  – период модуляции;  $N$  – коэффициент, нормирующий различные алгоритмы ШИМ по числу переключений за цикл модуляции;  $\Delta I(t) = I_z(t) - I(t)$  – токовая ошибка ( $I_z(t), I(t)$  – заданное и фактическое значения выходного тока инвертора напряжения).

В работе получены области, в которых исследуемые алгоритмы дают минимум коммутационных потерь. Эти области представлены графически в виде функции от углового положения вектора напряжения и величины напряжения относительно его максимального значения. Недостатком такого подхода является то, что он дает относительные оценки в пределах цикла модуляции и не дает интегральных оценок дополнительных коммутационных потерь на периоде основной гармоники, а также их зависимости от коэффициента мощности нагрузки и других параметров, оказывающих влияние на коммутационные потери.

В [6] предложен метод цифрового управления ключами трехфазного инвертора в замкнутом контуре регулирования мгновенными значениями тока статора, основанный на комбинациях разных законов коммутации, оптимизированных по различным критериям. Использована комбинация трех вариантов ШИМ: «треугольного», взятого в качестве базового для улучшения энергетических показателей ШИМ, «ромбовидного», формируемого в граничной области перехода из сектора в сектор в целях исключения области неуправляемости и «шестиугольного», использование которого обеспечивает предельно достижимые динамические свойства контура тока. «Ромбовидный» алгоритм формируется из трех значащих и двух нулевых образующих векторов двух смежных секторов векторной диаграммы напряжений. В [7] рассмотрено решение проблемы компенсации «мертвого» времени в алгоритме пространственно-векторной «треугольной» ШИМ для инвертора с неидеальными ключами.

В данной работе предложен критерий оценки энергетики ШИМ, представлены результаты выполненных на его основе исследований, предложена методика выбора оптимальной ШИМ, позволяющие:

- получать интегральные, в том числе абсолютные оценки отдельных составляющих коммутационных потерь для различных алгоритмов с жестким законом модуляции (периодом ШИМ);
- осуществлять сравнение энергетических показателей различных алгоритмов ШИМ;
- осуществлять выбор оптимального алгоритма ШИМ в зависимости от режима работы преобразователя, характеризуемого величиной напряжения и косинуса угла нагрузки.

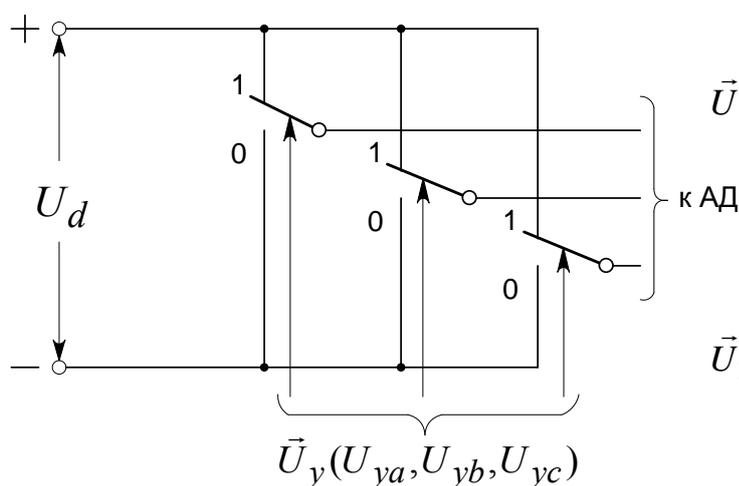


Рис.1. Схема замещения трехфазного инвертора напряжения с идеальными ключами

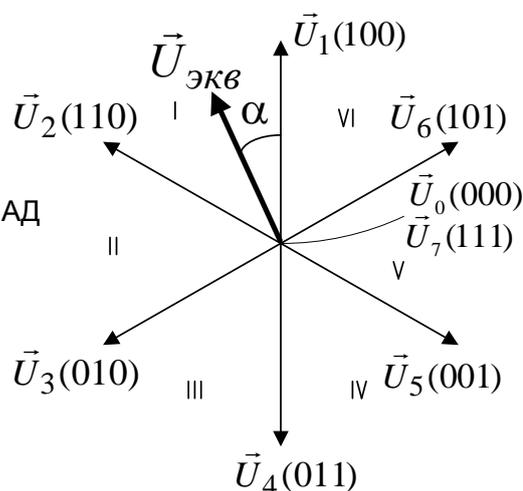


Рис.2. Векторная диаграмма выходных напряжений инвертора

### Законы коммутации и критерий энергетической эффективности ШИМ

Из всего многообразия законов коммутации трехфазного инвертора по критерию энергетической эффективности более подробно имеет смысл рассмотреть только три закона (1),(2),(3), которые формируются из векторов, образующих треугольный сектор векторной диаграммы напряжений (двух значащих и двух нулевых), характеризуемых минимальным числом переключений за цикл модуляции и симметрией управления фазами. Все остальные законы коммутации, в частности законы, использующие значащие векторы из других секторов векторной диаграммы заведомо уступают этим трем по энергетическим показателям. На рис.3 показаны диаграммы переходов между векторами напряжений для всех трех законов, а на рис.4 временные диаграммы управления фазами и напряжение фазы А нагрузки, соединенной в звезду, при нахождении вектора эквивалентного напряжения в первом секторе векторной диаграммы напряжений.

$$\rightarrow \vec{U}_0 \rightarrow \vec{U}_1 \rightarrow \vec{U}_2 \rightarrow \vec{U}_1 \rightarrow \vec{U}_0 \rightarrow \quad (1)$$

$$\rightarrow \vec{U}_7 \rightarrow \vec{U}_2 \rightarrow \vec{U}_1 \rightarrow \vec{U}_2 \rightarrow \vec{U}_7 \rightarrow \quad (2)$$

$$\rightarrow \vec{U}_0 \rightarrow \vec{U}_1 \rightarrow \vec{U}_2 \rightarrow \vec{U}_7 \rightarrow \vec{U}_2 \rightarrow \vec{U}_1 \rightarrow \vec{U}_0 \rightarrow \quad (3)$$

Согласно результатам, полученных в [5], алгоритмы (1), (2) следует применять только совместно, причем угловые секторы векторной диаграммы напряжений, в которых применяются эти алгоритмы, должны чередоваться каждые  $\pi/6$  и занимать область от границы сектора до его середины. Так, в первом секторе векторной диаграммы напряжений на интервале  $(0 \dots \pi/6)$  при отсчете угла от образующего вектора  $\vec{U}_1$  работает алгоритм (2), а на интервале  $(\pi/6 \dots \pi/3)$  – алгоритм (1).

Для сравнения дополнительных потерь в системе «преобразователь – двигатель», вызываемых переключениями в инверторе, при различных законах коммутации введем следующий критерий:

$$J = \frac{1}{nT_k} \sum_{k=1}^n \int_0^{T_k} [\Delta I(t)]^2 dt, \quad (4)$$

где  $n = \text{round}\left(\frac{mT}{T_k}\right)$ ,  $m = 1, 2, \dots$ ;  $T$  – период основной гармоники напряжения ( $T \gg T_k$ ).

Критерий представляет собой значение квадрата токовой ошибки, усредненное на периоде, кратном основной гармонике напряжения. Чтобы сравнение по данному критерию было корректным все алгоритмы ШИМ нужно привести к одинаковому числу коммутаций инвертора в единицу времени. Это приведение выполняется по выражению

$$T_k = \frac{N_k}{N_{k0}} T_{k0},$$

где  $N_k, N_{k0}$  – число переключений в периодах ШИМ сравниваемого и базового алгоритма;  $T_{k0}$  – период модуляции базового алгоритма. В качестве базового может быть принят любой из сравниваемых между собой алгоритмов ШИМ. Для него жестко задается период модуляции.

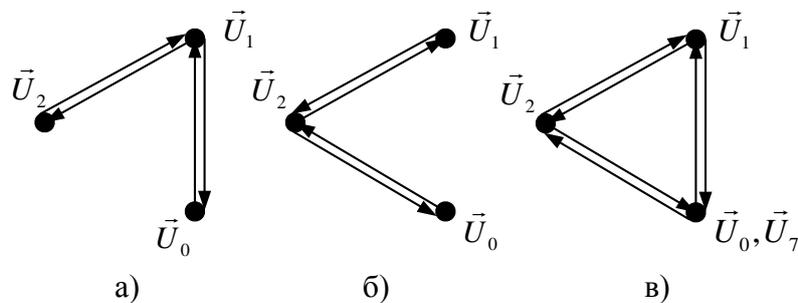


Рис. 3. Диаграммы переходов между векторами напряжений: а – закон коммутации (1); б – закон коммутации (2); в – закон коммутации (3)

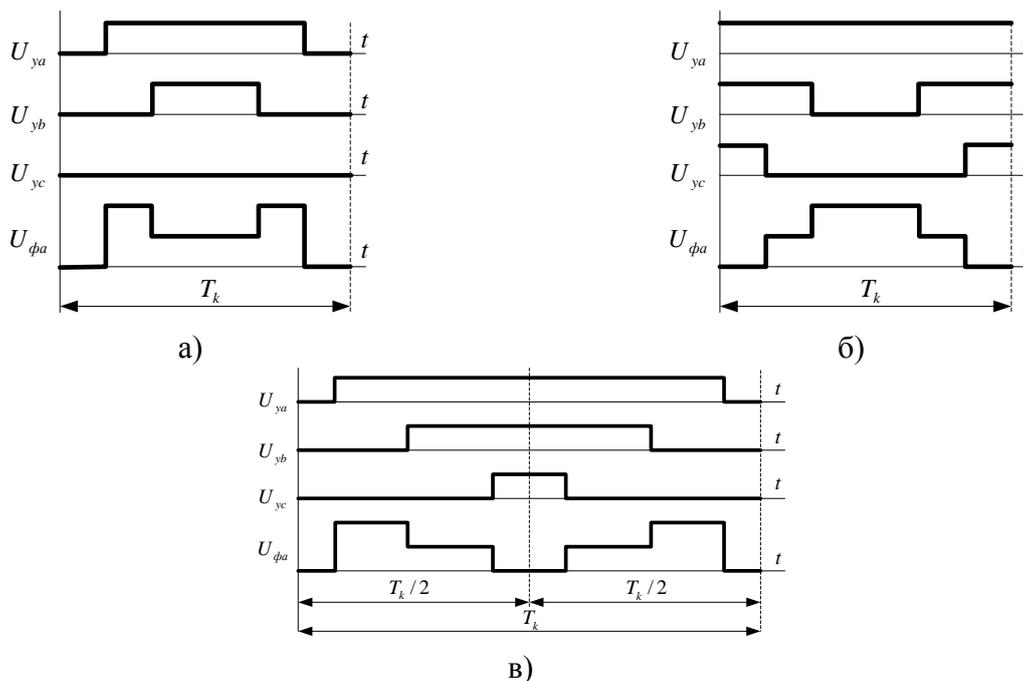


Рис.4. Временные диаграммы управления фазами и напряжение фазы А нагрузки: а – закон коммутации (1); б – закон коммутации (2); в – закон коммутации (3)

В частности, если в качестве базового алгоритма выбрать алгоритм (1) или (2), то период модуляции алгоритма (3) определяется выражением  $T_k = 1,5T_{kб}$ . Физический смысл критерия (4) состоит в том, что он представляет собой абсолютную величину дополнительных коммутационных потерь в нагрузке с активным сопротивлением 1 Ом. Если нагрузкой преобразователя является асинхронный двигатель, то произведение критерия на активные сопротивления фаз статора и ротора, приведенных к частоте ШИМ, умноженное на коэффициент 3/2, позволяет приблизительно вычислить дополнительные потери от ШИМ в обмотках статора и ротора соответственно. Для двигателя с которым проводился модельный эксперимент  $R_s = 2,44 \text{ Ом}$ ,  $R_r = 1,75 \text{ Ом}$ .

### Результаты моделирования

На рис.5 изображены зависимости энергетического критерия от относительного напряжения и косинуса угла нагрузки, полученные для двух вариантов алгоритма модуляции: ШИМ1 соответствует закону коммутации (3), который в литературе иногда называют "центрированной" ШИМ, а ШИМ2 – комбинации из двух законов коммутации (1) и (2). Зависимости получены в среде моделирования Delphi при следующих условиях: тип двигателя 4A112MA6Y3; входное напряжение инвертора 520 В; ключи инвертора - идеальные; частота модуляции ШИМ2 (взята в качестве базовой) 4000 Гц; максимальная величина выходного напряжения  $U_{max} = 220 \text{ В}$ .

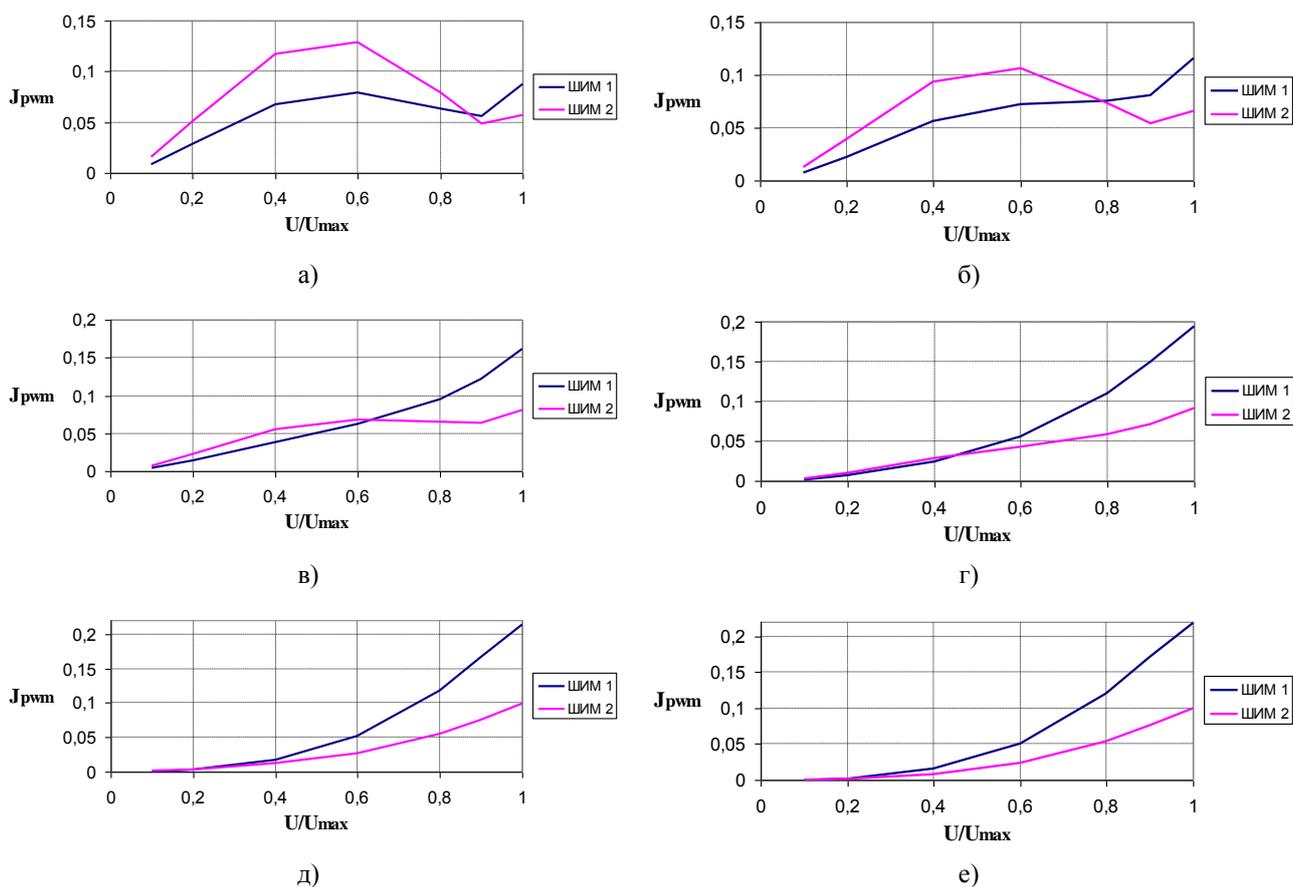


Рис. 5. Зависимости энергетического критерия от относительного напряжения и косинуса угла нагрузки: а)  $\cos(\varphi) = 0,9$ ; б)  $\cos(\varphi) = 0,8$ ; в)  $\cos(\varphi) = 0,6$ ; г)  $\cos(\varphi) = 0,4$ ; д)  $\cos(\varphi) = 0,2$ ; е)  $\cos(\varphi) = 0$

Анализ зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

- 1) энергетический критерий существенно зависит от вида ШИМ, относительного уровня напряжения и косинуса угла нагрузки, эти зависимости существенно нелинейны;
- 2) выбор оптимального по данному критерию вида ШИМ определяется режимом работы преобразователя (уровнем напряжения и косинусом угла нагрузки), при этом:
  - в области малых значений  $\cos(\varphi)$  ШИМ2 является оптимальным во всем диапазоне изменения напряжения (графики на рис.1 д,е не пересекаются);
  - точка равенства абсолютных значений критерия (точка пересечения кривых на рис.1 а–г) постепенно смещается из области малых в область больших напряжений по мере увеличения  $\cos(\varphi)$ ;
  - в области больших напряжений ( $U/U_{\max} > 0,9$ ) ШИМ2 имеет однозначное преимущество перед ШИМ1 вне зависимости от значения  $\cos(\varphi)$ , при этом для  $U/U_{\max} = 1$  потери в меди при ШИМ2 приблизительно в 2 раза меньше, чем при ШИМ1;
  - в области нагрузок с  $\cos(\varphi) > (0,6...0,7)$  и при  $U/U_{\max} < (0,7...0,8)$  преимущество по дополнительным потерям имеет ШИМ1;
- 3) наиболее тяжелым режимом с точки зрения дополнительных коммутационных потерь в двигателе для ШИМ1 является режим работы на максимальных напряжениях близко к холостому ходу двигателя, а для ШИМ2 – в режимах больших моментов нагрузки (больших значений  $\cos(\varphi)$ ) в середине диапазона изменения напряжения ( $U/U_{\max} = 0,4...0,6$ );

Исследования чувствительности энергетического критерия к другим параметрам и переменным показали, что энергетический критерий практически не зависит от частоты основной гармоники напряжения и от величины тока. Очевидно, что абсолютное значение критерия зависит от частоты модуляции. В первом приближении при линейном характере нагрузки значение критерия изменяется обратно пропорционально квадрату частоты модуляции.

Таким образом, чтобы однозначно выбрать оптимальный алгоритм ШИМ необходимо выполнять анализ режимов работы электропривода. Очевидно, что получения наибольшего эффекта от экономии на дополнительных потерях можно добиться путем изменения алгоритма ШИМ непосредственно в процессе работы привода в зависимости от режима работы. Реализация такого подхода требует поддержания системой управления обоих вариантов ШИМ, решение проблемы плавного перехода между ними и, главное, задание функции двух параметров (напряжения и  $\cos(\varphi)$ ) для переключения между алгоритмами. Это вполне реализуемо на основе результатов представленных выше исследований, однако приводит к некоторому усложнению системы управления.

В ряде случаев существенного эффекта удастся достичь, выбирая один из вариантов ШИМ путем анализа режимов работы привода на начальных этапах его проектирования. Такой подход становится возможным, если известна типовая диаграмма работы привода. Для практической реализации такого подхода была разработана следующая методика выбора оптимального варианта ШИМ на основе типовой диаграммы работы привода.

1. Рассчитываются значения  $U/U_{\max}$  и  $\cos(\varphi)$  для каждого участка типовой диаграммы работы преобразователя.
2. Определяются значения энергетического критерия для каждого участка типовой диаграммы работы преобразователя и для обоих алгоритмов ШИМ по зависимостям  $J_{PVM}$  от  $U/U_{\max}$  и  $\cos(\varphi)$ .
3. Вычисляются средние за типовой цикл значения критерия для обоих алгоритмов ШИМ.
4. Выбирается алгоритм с наименьшим значением критерия.
5. Рассчитывается эффект от выбора одного алгоритма в сравнении с другим путем определения разности средних за типовой цикл значений дополнительных потерь в обмотках нагрузки.

Заметим, что точность расчета по данной методике в значительной степени зависит от точности задания типовой диаграммы работы привода. Параметры динамических участков работы преобразователя приближенно приводятся к эквивалентным статическим участкам с усредненными значениями  $U/U_{\max}$  и  $\cos(\varphi)$ .

В ряде преобразовательных устройств, работающих в силу своего предназначения в строго ограниченных режимах по напряжению и углу нагрузки, выбор оптимального алгоритма ШИМ становится predetermined. Например, для активных выпрямителей и источников трехфазного питания на базе инверторов напряжения, спроектированных на работу при высоких кратностях  $U/U_{\max}$ , оптимальной является ШИМ2. Если источник питания «зарегулирован» по напряжению ниже коэффициента 0,8 и работает на нагрузку с большими значениями  $\cos(\varphi)$ , то оптимальной является ШИМ1.

### **Заключение**

1. Предложен критерий оценки энергетики ШИМ, позволяющий получать интегральные оценки дополнительных потерь в обмотках статора и ротора от переключений в инверторе.
2. Выполнена сравнительная оценка энергетической эффективности двух наиболее рациональных для использования алгоритмов ШИМ при вариации глубины модуляции и косинуса угла нагрузки. Получены зависимости, позволяющие осуществлять выбор оптимальных областей работы каждого из алгоритмов.
3. Предложена методика, позволяющая осуществлять выбор оптимальной ШИМ по типовой диаграмме работы преобразователя.

### **Список литературы**

1. Архангельский, Н.Л. Новые алгоритмы в управлении асинхронным электроприводом / Н.Л. Архангельский, Б.С. Курнышев, А.Б. Виноградов // Электротехника. – 1991. – №10. – С. 9–13.
2. Holtz, J Pulsewidth modulation – a survey / J. Holtz // Proceedings of the 1992 IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC'92. – pp.11–18.
3. Архангельский, Н.Л. Формирование алгоритмов управления в частотно-управляемом электроприводе / Н.Л. Архангельский, В.Л. Чистосердов // Электротехника. – 1994. – №3. – С. 48–52.
4. Архангельский, Н.Л. Контур тока асинхронного электропривода с улучшенными регуляционными и энергетическими характеристиками / Н.Л. Архангельский, А.Б. Виноградов // Электротехника. – 1997. – №4. – С. 6–11.
5. Ryvkin, S Commutation Laws Transfer Strategy for the Feedforward Switching Losses Optimal PWM for Three-phases Voltage Source Inverter / S. Ryvkin, D. Isosimov, S. Belkin
6. Виноградов, А.Б. Цифровая релейно-векторная система управления асинхронным электроприводом с улучшенными динамическими характеристиками / А.Б. Виноградов // Электричество.– 2003. – №6. – С. 43–51.
7. Виноградов, А.Б. Адаптивная система векторного управления асинхронным электроприводом / А.Б. Виноградов, В.Л. Чистосердов, А.Н. Сибирцев // Электротехника. – 2003. – №7. – С. 7–17.