

УДК 621.3

**О. Н. ПАРФЕНОВИЧ** (канд. техн. наук, доц.), **О. А. КАПИТОНОВ**  
 Государственное учреждение высшего профессионального образования  
 «Белорусско-Российский университет»  
[bru@bru.by](mailto:bru@bru.by)

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД В ЭЛЕКТРОМЕХАТРОННОМ ИСПОЛНЕНИИ СО СПЕЦИАЛЬНЫМ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ – ПЕРСПЕКТИВНАЯ АЛЬТЕРНАТИВА ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОМУ ЭЛЕКТРОПРИВОДУ

В статье рассмотрены вопросы разработки асинхронного электропривода в электромехатронном исполнении с параметрическим регулированием скорости вращения вала электродвигателя. Данный электропривод содержит электродвигатель специальной конструкции и встроенный в его корпус регулятор напряжения. Показаны преимущества разрабатываемой системы электропривода перед частотно-регулируемыми электроприводами.

**Ключевые слова:** преобразователь частоты, тиристорный регулятор напряжения, асинхронный электропривод, параметрическое регулирование, энергосбережение, электромехатронное исполнение.

Современный автоматизированный электропривод представляет собой весьма сложную электромехатронную систему преобразования энергии (ЭМП), структуру которой можно представить в виде следующей схемы (рис. 1).

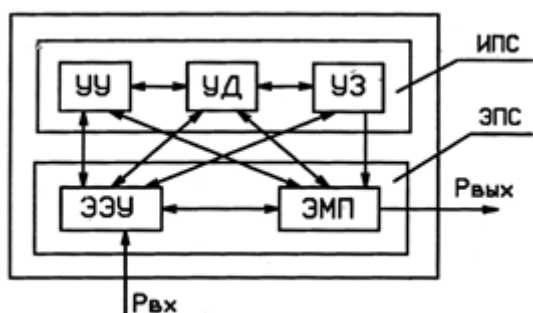


Рисунок 1 - Структура электромехатронного преобразователя энергии.

Наиболее крупными элементами системы ЭМП являются энергетическая (ЭПС) и информационная (ИПС) подсистемы, если их выделить по функциональному признаку. В свою очередь, основные узлы энергетической подсистемы – это электродвигатель – электромеханический преобразователь (ЭМП) и энергетическое электронное устройство (ЭЭУ) – силовой блок преобразователя. Информационную подсистему образуют устройства управления (УУ), диагностирования (УД) и защиты (УЗ).

Еще с позапрошлого века, со времен Доливо-Добровольского весь комплекс преобразования электроэнергии (по рис. 1) было принято размещать в виде 2-3 отдельных конструктивных изделий (электродвигатель –

ЭМП, преобразователь – ЭЭУ, ИПС, пульт управления - УУ).

В настоящее время, в связи с возможностями микроэлектроники ИПС может обеспечить практически неограниченное количество функциональных операций с электродвигателем (зарубежные фирмы заявляют до 200), причем в блоке с достаточно небольшими размерами. Достижения в области IGBT и MOSFET технологий производства мощных транзисторов позволили значительно снизить и габаритные характеристики силового электронного блока ЭПС. Как результат электротехнические компании, с началом нового столетия, стали предлагать рынку электродвигателей электромехатронные изделия, у которых подсистемы ИПС – ЭПС были совмещены в однокорпусной конструкции. Но дальше дело не пошло! Рынок не принял такие изделия. Сейчас предлагается преобразователи, системы управления и защиты устанавливать отдельно от электродвигателей. Почему? С нашей точки зрения, потому что, во-первых, стоимость ЭМП с преобразователем частоты в однокорпусном исполнении в 4-5 раз превышает стоимость электродвигателя (при этом окупаемость затрат весьма проблематична, во-вторых, потери электроэнергии непосредственно в электронном преобразователе (ЭЭУ) частотно-регулируемого электропривода, работающего на модулируемой частоте 4-15 кГц настолько значительны, что они дополнительно разогревают корпус электродвигателя, тем самым снижая его выходную мощность). Имеются также проблемы с электромагнитной совместимостью в одном корпусе подсистемы ИПС и ЭПС, работающих в среде широкого спектра мощных гармоник от коммутации силовых токов электродвигателя с частотой 4-15 кГц, что существенно влияет на надежность ЭМП в целом. Здесь следует, пожалуй, обратить внимание на то, что к настоящему времени многие электротехнические компании, производящие силовую преобразовательную технику и электродвигатели, усиленно рекламируют и рекомендуют к применению в различных отраслях производства именно частотно-регулируемые электроприводы, работающие на модулируемой частоте 4-15 кГц (рис. 2).

© Парфенович О. Н. Капитонов О. А., 2013

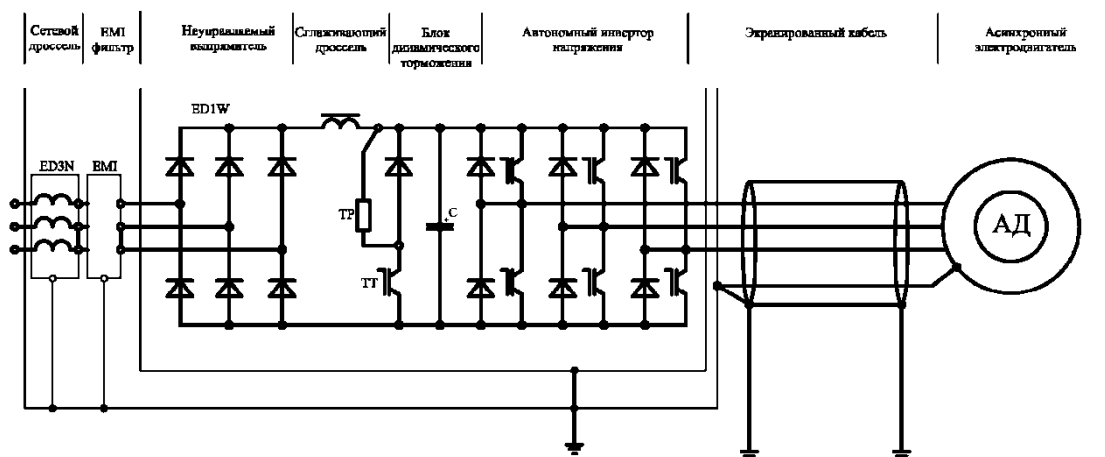


Рисунок 2 – Функциональная схема современного частотного электропривода серии L300P Hitachi.

При этом обращается внимание, прежде всего, на возможность получения в таких системах сверхширокого диапазона регулирования скорости асинхронного электродвигателя, расширение функциональных возможностей электропривода в целом (ранее уже отмечалась цифра – до 200), и как один из примеров – «Установка в нагнетателях вместо дросселирования регулируемых электродвигателей дает экономию электроэнергии до 40-50%, воды – до 10-15%, тепла – до 20%» [1].

С нашей точки зрения здесь не все так просто. Хорошо известны недостатки частотно-регулируемых электроприводов. К ним относятся:

- 1 Двукратное преобразование силовой энергии в преобразователе, что снижает его КПД;
- 2 Высокочастотная (до 15 кГц) модуляция силового тока в транзисторном инверторе, что увеличивает потери в транзисторах, снижает КПД преобразователя, снижает его надежность;
- 3 Наличие цепей сквозного короткого замыкания в транзисторном инверторе, что также снижает надежность силового блока преобразователя;
- 4 Высокочастотная составляющая модулируемого силового тока (до 15 кГц) в определенной степени ускоряет разрушение изоляции статорной обмотки электродвигателя, чем также снижается его надежность. По этой же причине фирмы ограничивают использование приводного электродвигателя по среднему току (моменту) коэффициентом  $K_c = 0.85$ , что указывает на снижение КПД электродвигателя при его работе от ПЧ, даже на естественной характеристике;
- 5 Наличие трех каналов управления инвертором ПЧ (частотой, напряжением и формой тока) также не в лучшую сторону сказывается на надежности преобразователя;
- 6 Отсутствует в данной системе возможность рекуперации электроэнергии;
- 7 Если управляемый от ПЧ электродвигатель не имеет вентилятора-наездника, его допустимый по условиям нагрева момент на нулевой частоте вращения ротора снижается до 0,4 Мн, с вентилятором до 0,7 Мн;
- 8 Весьма существенна проблема данного преобразователя, связанная с электромагнитной совместимостью. Транзисторы автономного инвертора переключаются с высокой частотой, генерируя широкий спектр гармоник.

До настоящего времени не исследовано влияние мощного электромагнитного излучения электроприводов с ПЧ, работающих на модулируемой частоте силовых токов 4 - 15 кГц, на окружающую среду, в частности, на обслуживающий персонал, что может со временем оказаться определяющим фактором, резко ограничивающим применение электроприводов подобного типа. Высокочастотные гармонические составляющие создают дополнительные потери в электродвигателе, что приводит к снижению его КПД. Согласно полученным нами экспериментальным данным, приведенным в табл. 1, суммарные потери в преобразователе и фильтрах могут достигать 15% от номинальной мощности электропривода, а дополнительные потери в электродвигателе, вызванные импульсным характером питающего напряжения – 10-20%. К такому же выводу пришли и ученые Ивановского государственного энергетического университета [2]. При этом, следует отметить, что применение фильтров не решает проблему снижения КПД электропривода из-за влияния высокочастотных гармоник, так как потери не исчезают, а переносятся из электродвигателя в фильтры.

Таблица 1 — Результаты измерения КПД для различных узлов ПЧ.

Узел	$P_{вх}$ , Вт	$P_{вых}$ , Вт	$\eta$
Входной фильтр	3382	3314	0,98
ПЧ	3314	3148	0,95
Выходной фильтр	3148	2896	0,92
Сумма	3382	2896	0,85

Таким образом, общий КПД системы частотнорегулируемого электропривода, например с электродвигателем 4A100S4, с которым мы и проводили исследования

$$h_{\Sigma} = h_{дн} h_{дф} h_{пр} = 0,81 * 0,8 * 0,85 = 0,55,$$

где  $h_{дн}$  – КПД электродвигателя,  $h_{дф}$  – снижение КПД электродвигателя от влияния гармонического спектра токов,  $h_{пр}$  – КПД преобразователя, что по потерям энергии соизмеримо с максимальными цифрами экономии электроэнергии, которые рекламируют некоторые электротехнические компании, при использовании частотнорегулируемых электроприводов в различных типах технологических процессов. Кстати, большими потерями в преобразователе и электродвигателе можно также объяснить несовместимость их в единой конструкции в габаритных размерах соответствующей по мощности стандартной электромашин.

Мы предлагаем альтернативу электроприводам с ПЧ – электроприводы с разработанным нами электродвигателем (рис. 3), специально предназначенным для работы с тиристорным регулятором напряжения (система ТРН-АД, рисунок 4), которые во многом лишены приведенных выше недостатков системы ПЧ-АД.

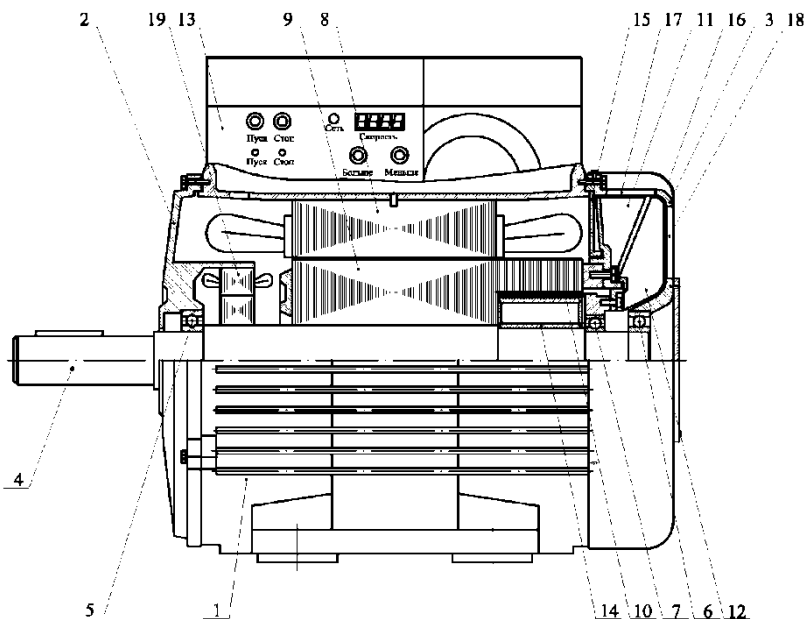


Рисунок 3 - Особенности конструкции асинхронного электродвигателя специально предназначенного для работы с тиристорным регулятором напряжения. Конструктивная схема ДАС в электромехатронном исполнении: 1 - станина электродвигателя; 2, 3 - подшипниковые щиты; 4 - вал силового ротора; 5, 6 - подшипники силового ротора; 7 - подшипник малого ротора; 8 - магнитопровод статора с обмоткой; 9 - удлиненный магнитопровод силового ротора со стержневой обмоткой; 10 - малый ротор вентилятора; 11 - вентилятор-теплорассеиватель, закрепленный на силовом роторе; 12 - вентилятор, закрепленный на малом роторе; 13 - клеммная коробка со встроенным электронным блоком регулирования; 14 - магнитопровод малого ротора вентилятора; 15 - кольцевая перегородка; 16 -- кожух; 17 - осевые отверстия подшипникового щита для вывода охлаждающего воздуха из электродвигателя; 18 - радиальные отверстия подшипникового щита для ввода охлаждающего воздуха в электродвигатель; 19 - датчик скорости.

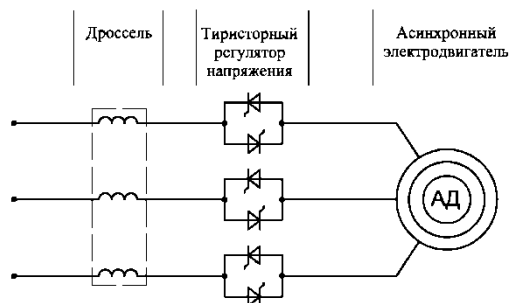


Рисунок 4 - Функциональная схема системы ТРН-АД.

Пожалуй, единственный недостаток данной системы электропривода – это повышенные, пропорционально скольжению, потери в электродвигателе на регулировочных характеристиках.

Предлагаемая система электропривода в электромехатронном исполнении обеспечивает 5 основных, в т. н. базовой комплектации, функциональных режимов работы электродвигателя:

- 1 Управляемый пуск;
- 2 Управляемое торможение;
- 3 Регулирование частоты вращения в диапазоне 10;
- 4 Режим энергосбережения на номинальной скорости электродвигателя;

5 Момент электродвигателя по условиям нагрева при заторможенном роторе  $M_d=(0,3...0,4)M_n$ .

Указанные режимы работы достаточны для 80 – 90% электродвигателей, используемых в производстве.

Применение электродвигателя по конструктивной схеме ДАС, а также размещение регулятора напряжения в корпусе электродвигателя позволило решить ряд проблем, характерных для традиционной системы ТРН-АД со стандартным электродвигателем.

При длительной работе системы ТРН-АД на пониженной скорости энергия скольжения, выделяющаяся в виде тепла в стержневой обмотке ротора, увеличивается пропорционально увеличению скольжения, из-за чего при использовании стандартного асинхронного электродвигателя для обеспечения допустимого по нагреву режима его работы требуется завышение мощности электродвигателя даже при работе на нагрузку вентиляторного типа до 3-4 раз. Стандартный электродвигатель в таком режиме используется нерационально, что значительно ограничивает области применения системы электропривода ТРН – стандартный АД. Для решения этой проблемы в электродвигателе ДАС применена измененная конструкция ротора, которая позволяет эффективно выносить тепловые потери в стержневой обмотке силового ротора в зону интенсивного охлаждения радиатором-вентилятором и дополнительным вентилятором, установленным на втором (малом) роторе, вращающемся с постоянной подсинхронной скоростью, независимой от скорости вращения основного ротора. Благодаря такому конструктивному решению значительно повышается допустимый по условиям нагрева момент на валу электродвигателя при его работе на регулировочных характеристиках, что позволяет использовать данные электродвигатели без завышения номинальной мощности для длительной работы на пониженной скорости при питании от регулятора напряжения на нагрузку, например, вентиляторного типа.

Также особенности конструкции электродвигателей ДАС позволяют уменьшить амплитуду высших гармоник токов статора и ротора за счет увеличения эффекта частотного сжатия тока в стержнях выступающей части ротора, а изменение формы пазов статора и ротора, схемы обмотки статора – улучшает его электромеханические характеристики.

В табл. 2 приведены технические характеристики электродвигателя по конструктивной схеме ДАС с тиристорным регулятором напряжения в электромехатронном исполнении, электродвигатель выполнен на базе стандартного АИР100S4.

Таблица 2 - Характеристики электродвигателя по конструктивной схеме ДАС в электромехатронном исполнении.

Технические характеристики	Система ТРН-АД
1. Допустимый по условиям нагрева электродвигателя момент нагрузки при $n=n_{ном}$ , Н·м	26,7
2. Потребляемая полная мощность электропривода при $n=n_{ном}$ , ВА	5673
3. КПД системы при $n=n_{ном}$	0,84
4. $\cos\phi$ системы при $n=n_{ном}$	0,84
5. Допустимый по условиям нагрева электродвигателя момент нагрузки при $n_2=0$ , Н·м	8
6. Диапазон регулирования	10
7. Пуск	управляемый
8. Торможение	управляемое
9. Габариты электродвигателя	100S4
10. Габариты преобразователя (без фильтров), мм	Встроен в электродвигатель
11. Масса электродвигателя, кг	28,8
12. Масса преобразователя, кг	1
13. Цена преобразователя, у.е.	200 - 300

**Выводы.** 1 Предлагаются в качестве альтернативы частотно-регулируемым электроприводам для большинства производств машин и механизмов электроприводы в электромехатронном исполнении, выполненные на базе специального асинхронного с к. з. ротором электродвигателя и тиристорного регулятора напряжения.

2 Учитывая значительно более низкую цену предлагаемой системы электропривода, меньшие потери электроэнергии в номинальном режиме, более высокую надежность и электромагнитную совместимость система ТРН – специальный АД в перспективе может стать преимущественной альтернативой современным частотным электроприводам.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильинский Н. Ф. Опыт и перспективы применения регулируемого электропривода насосов и вентиляторов / Н. Ф. Ильинский // Тезисы докладов XII Всероссийской конференции. – СПб., 1995. - С. 12.



2. Казаков Ю.Б. Зависимость потерь в асинхронных двигателях от параметров широтно-импульсного регулирования напряжения / Ю.Б. Казаков, А. А. Шумин, В. А. Андреев // Вестник ИГЭУ. - 2007. - Вып. 3. – С. 1-4.

3. Асинхронный электродвигатель, регулируемый, Парфеновича: патент 4647 РБ, Н02 К9/06 / О.Н. Парфенович; заявл. 10.10.94; опубл. 25.04.06, Бюл. № 5.

#### REFERENCES

1. P'inskiy N. F. Experience and prospects of use the adjustable electric drive of pumps and fans. XII Vserossiyskaya konferentsiya (XII All-Russia Conference). St. Petersburg, 1995, p. 12.

2. Kazakov Yu. B., Shumin A. A., Andreev V. A. The Dependence of Loss in Asynchronous Motors of Pulse-Duration Voltage Variation Parametres. Vestnik IGEU; 2007 (3): 1-4.

3. Patent 4647 RB, H02 K9/06 Asynchronous electric motor, adjustable, by Parfenovich / O. N. Parfenovich; declared 10.10.94; published 25.04.06 Bulletin №5.

Надійшла до редакції 20.02.2013

Рецензент: Є.Б. Ковальов

О.Н. ПАРФЕНОВИЧ, О.А. КАПІТОНОВ

Державна установа вищої професійної освіти «Білорусько-російський університет»

**Параметричний електропривод в електромехатронном виконанні із спеціальним асинхронним електродвигуном – перспективна альтернатива частотно-регульованому електроприводу.** В статті розглянуті питання розробки асинхронного електроприводу в електромехатронном виконанні із параметричним регулюванням швидкості обертання валу електродвигуна. Даний електропривод містить електродвигун спеціальної конструкції і вбудований в його корпус регулятор напруги. Показані переваги системи електроприводу, що розробляється, перед частотно-регульованими електроприводами.

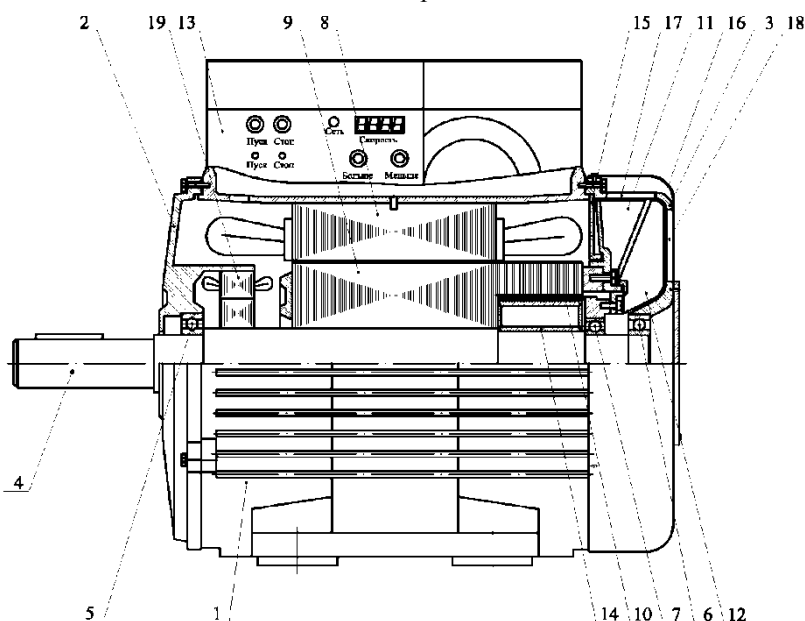
**Ключові слова:** перетворювач частоти, регулятор напруги, асинхронний електропривод, параметричне регулювання, енергозбереження, електромехатронне виконання.

O. PARFENOVICH, O. KAPITONOV

State Institution of Higher Professional Education "Belarusian-Russian University"

**Parametrical Electric Drive in the Electro-Mechatronic Performance with the Special Asynchronous Electric Motor - Preferential Alternative to the Frequency Electric Drives.** Parametrical electric drive in the electro-mechatronic performance is offered in the article. It is made with the special asynchronous electric drive intended for the work with the thiristor voltage adjuster.

The singular features of the construction are shown on the picture.



Picture 1 - Singular features of the construction of the asynchronous electric drive by the constructive scheme DAC with the two rotor electromechanics.



1- Electric drive engine support; 2,3 –bearing panels; 4 – shaft of the power rotor; 5,6- power rotor bearings; 7- small rotor bearing; 8-stator magnetic conductor with winding; 9- the extended power rotor magnetic conductor with the bar winding; 10- fan small rotor; 11- fan-heat spreader, fixed on the power rotor; 12- fan, fixed on the small rotor; plug box with the built-in electronic control unit.; 14- magnetic conductor of the fan small rotor; 15- ring baffle; 16- housing; 17-axial bores of the bearing panels for withdrawing of the cooling air from the motor; radial bores of the bearing panels for the injecting of the cooling air into the electric drive; 19- speed gauge.

The thyristor voltage adjuster is built in the unit 13. It is made by three-phase fully controlled antiparallel scheme.

The basic complete set of the electric drive provides:

1. Controlled start
2. Controlled braking
3. Speed is controlled in the range of 10 with admissible by heating conditions moment and minimal speed  $M_g=(0,3-0,4) M_n$ .
4. Energy conservation operating modes on the nominal drive speed.

Indicated operating modes are enough for 80-90 % of electric drives used in production.

Taking into account lower price, less drive's losses in the nominal mode, higher reliability and electro-mechatronic compatibility, the offered electric drive system can become preferential alternative to the modern frequency electric drives.

**Key words:** *frequency converter, thyristor voltage regulator, asynchronous electric drive, parametrical regulation, energy saving, electro-mechatronic performance.*