

Сравнительное исследование частотных преобразователей трехфазных электродвигателей в автоматическом управлении технологическим параметром

Благовещенская Маргарита Михайловна¹, Веселов Михаил Викторович¹

¹ ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств»

Корреспонденция, касающаяся этой статьи, должна быть адресована Благовещенской Маргарите Михайловне, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств», адрес: 125080, Москва, Волоколамское шоссе, дом 11, e-mail: mmb@mgurp.ru

Частотные преобразователи асинхронных трехфазных электродвигателей переменного тока получили широкое распространение в промышленности, в том числе и в производстве пищевой продукции. Полное понимание технических возможностей частотных преобразователей способствует их эффективному использованию. В данной статье рассматривается техническое сравнение двух частотных преобразователей трехфазных электродвигателей российской компании «ОБЕН» и датской компании «DANFOSS» по критерию качества регулирования технологического параметра. Для сравнения был создан испытательный стенд, в котором поочередно, в одинаковых условиях проводили тестирование устройств. В ходе подготовки и выполнения тестирования выяснилось, что аппаратные возможности частотных преобразователей для применения их в регулировании технологических параметров одинаковые, а параметрические возможности – различны. Частотный преобразователь компании «ОБЕН» оснащен ПИ-регулятором, а частотный преобразователь от компании «DANFOSS» – ПИД-регулятором. Как показывают результаты тестирования устройств, несмотря на такое различие, при соответствующей настройке частотный преобразователь компании «ОБЕН» не уступает частотному преобразователю компании «DANFOSS» по качеству регулирования технологического параметра.

Ключевые слова: частотный преобразователь трехфазного электродвигателя, автоматическая система регулирования, технологический параметр производственного процесса.

Введение

Регулирование технологических параметров в производственных процессах – наиважнейшая техническая задача, от качества решения которой зависит множество показателей эффективности производства, таких как: качество и безопасность выпускаемой продукции, экономические показатели производства – производительность технологического оборудования, снижения количества брака, себестоимость продукции, комфортные условия труда производственного персонала (Алейников, 2018; Решетняк, 2010; Благовещенская, 2005). В производственных процессах для решения задач, связанных с регулированием технологических параметров широкое применение получили непрерывные регуляторы различных типов – П, ПИ, ПД, ПИД, с различными видами выходных сигналов управления – аналоговый, дискретный, ШИМ (Astrom, 2002). В последние годы в ряде случаев,

находят применение регуляторы на базе нечеткой логики – Fuzzy-PID Control. Они применяются как самостоятельные системы, так и в составе гибридных систем управления, в которых обычный регулятор задействован в прямом контуре, а нечеткий регулятор используется в дополнительном контуре для подстройки коэффициентов управления прямого регулятора (Xiwen, 2018; Varoud, 2016; Балыхин, 2019; Балыхин, 2017). Однако, существенным недостатком, сдерживающим широкое внедрение регуляторов на базе нечеткой логики, является сложность их разработки и настройки (Грибанов, 2018; Балыхин, 2017).

Системы автоматического регулирования создаются на базе различных технических средств, в том числе и с использованием частотных преобразователей трехфазных электродвигателей. Большинство частотных преобразователей, выпускаемых современными фирмами-производителями таки-

ми как: SIEMENS, SCHNEIDER ELECTRIC, DANFOSS, ОВЕН, ВЕСПЕР, и другие обладают всеми необходимыми аппаратными и параметрическими возможностями для применения их в одноконтурных системах регулирования с использованием в них встроенных различных типов регуляторов. Так, например, управляя скоростью вращения вала электродвигателя насоса с помощью частотного преобразователя с подключенным к нему датчиком давления, можно поддерживать необходимое значение давления в трубопроводной магистрали продукта. Максимально используя технические возможности частотных преобразователей, можно заметно сократить материальные затраты на оборудование автоматизации. Таким образом, понимание технических особенностей частотных преобразователей от различных фирм-производителей является актуальным.

Первые промышленные преобразователи частоты для регулирования скорости трехфазных электродвигателей компания “DANFOSS” выпустила в 1968 году (World Pumps, 2014)⁴.

Год основания компании «ОВЕН» - 1991. В ее ассортименте преобразователи частоты появились в 2010 году⁵.

Область применения этих частотных преобразователей очень широка, практически везде, где используется асинхронные трехфазные электродвигатели: насосы, вентиляторы, транспортеры, грузоподъемные механизмы, механизмы силовых манипуляторов, приводы мешалок, мельниц, дробилок, прессов, экструдеров, центрифуг (Karovsky, 2020; Calderon-Cordova, 2018; Благовещенская, 2009).

Проведенный анализ различных публикаций показал, что различные компании, применяющие в составе своего оборудования частотные преобразователи, получают значительную экономию эксплуатационных расходов и электроэнергии (Process Engineering, 2005; Carter, 2007; Schreitmüller, 2003; Martin, 2008; Петряков, 2018).

Совершенствование частотных преобразователей, их использование с целью управления скоростью вращения вала электродвигателя, как с использованием встроенного ПИД-регулятора, так и без его использования, актуально для промышленности. По этой проблематике имеются работы разных авторов и публикации в научно-технических журналах и в материалах конференций.

Maheswari K., в работе “Design of SVPWM based Closed-Loop Control of Voltage Source Inverter Fed Induction Motor Drive with PID Controller” 2020-го года исследует крутящий момент вала электродвигателя при изменении скорости его вращения с использованием широко-импульсной модуляции.

Sudjoko R., в работе “Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Using Universal Bridge and PID Controller” 2019-года с помощью программы MATLAB моделирует управление скоростью вала электродвигателя с использованием ПИД-регулятора.

Ramirez S. (Ramirez et al. 2018), в среде программирования “Lab View” на персональном компьютере исследовал работу различных типов регуляторов частотного преобразователя компании “DANFOSS” и представил свои результаты на конференции “World Congress on Engineering and Computer Science” в 2018 году в San Francisco - “A PID controller comparative study of tuning methods for a three-phase induction motor speed control”.

В данной статье рассматривается техническое сравнение двух частотных преобразователей трехфазных электродвигателей российской компании «ОВЕН» и датской компании “DANFOSS” по критерию качества регулирования технологического параметра.

Цель данной работы состоит в том, чтобы исследовать и сравнить технические возможности качества регулирования технологического параметра частотными преобразователями компании «ОВЕН» и “DANFOSS”.

Методика исследования

Исследование проводилось в неспециализированной лаборатории пищевого предприятия отдела автоматизации. Для исследования технических возможностей частотных преобразователей был разработан и собран исследовательский стенд. Принципиально стенд устроен следующим образом (Рис. 1): темпе-

Рисунок 1
Схема исследовательского стенда



⁴ World Pumps, journal. Volume 2014, Issue 3, March 2014, Pages 12, 14, 16

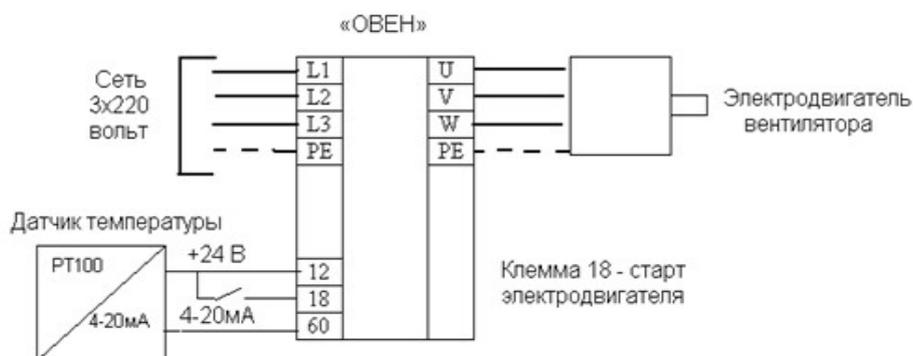
⁵ <https://owen.ru/istoriya>.

ратурный датчик РТ 100 с токовым преобразователем в стандартный сигнал 4 – 20 мА, с диапазоном измерения 0 -200 градусов Цельсия подключен к частотному преобразователю как сигнал обратной связи; лампа накаливания мощностью 40 Вт подключена к лабораторному автотрансформатору (ЛАТР); электродвигатель, с закрепленными на его валу лопастями вентилятора, подключен к частотному преобразователю. Датчик температуры расположили над лампой на расстоянии 20 мм. При свечении лампа выделяет тепловую энергию, от которой нагревается температурный датчик, а воздушный поток, создаваемый вентилятором, направили на датчик с лампой для их охлаждения. Вентилятор с диаметром лопастей 200мм расположили на расстоянии 600 мм от лампы с датчиком температуры. Яркость свечения лампы, следовательно, интенсивность выделения тепловой энергии и степень нагрева датчика температуры можно изменять автотрансформатором. Интенсивность воздушного потока, создаваемого вентилятором для охлаждения лампы и датчика меняется при изменении скорости вращения его электродвигателя с помощью частотного преобразователя.

Таким образом, вращая рукоятку автотрансформатора, мы будем имитировать температурные возмущения в объекте управления (лампа накаливания), а автоматическая система управления (на базе частотного преобразователя) будет их компенсировать, изменяя скорость воздушного потока, создаваемого вентилятором, посредством изменения частоты вращения вала электродвигателя с помощью исследуемого частотного преобразователя. Температуру на поверхности датчика будем контролировать бесконтактным инфракрасным термометром AR872D.

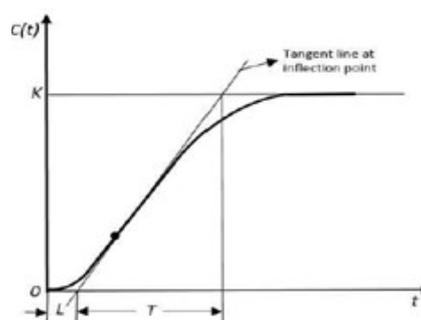
Рисунок 2

Электрическое подключение частотного преобразователя «ОВЕН»



Сначала в такой схеме был задействован частотный преобразователь компании «ОВЕН». Изучив Руководство по эксплуатации КУВФ.421212,004 РЭ⁶ частотного преобразователя, выполнили его необходимые электрические подключения, представленные на Рисунке 2, а также изменили его некоторые параметрические настройки, которые показаны в Таблице 1.

Настройки ПИ-регулятора приближенно рассчитали по первому методу Ziegler-Nichols (Patel, 2020), а затем в ходе эксперимента были незначительно скорректированы для достижения наилучшего результата.



$$K_p = 0,9T / L$$

$$T_i = L / 0,3$$

Затем в испытательный стенд был установлен частотный преобразователь компании “DANFOSS”⁷. Его электрическое подключение в большей степени совпадает с подключением преобразователя «ОВЕН», Рисунок 3, а параметрические настройки показаны в Таблице 2.

⁶ <https://owen.ru/manuals>

⁷ <https://files.danfoss.com/download/Drives/MG200B50.pdf>, <https://files.danfoss.com/download/Drives/MG200B02.pdf>

Таблица 1
 Параметрические значения частотного преобразователя «ОВЕН»

Номер параметра	Значение параметра	Пояснения
1-00	3	Режим работы- замкнутый контур управления
3-02	50	Минимальное задание (значение) регулируемого параметра, градус Цельсия
3-03	51	Максимальное задание (значение) регулируемого параметра, градус Цельсия
4-12	0	Нижний предел скорости вращения электродвигателя, Гц.
4-14	50	Верхний предел скорости вращения электродвигателя, Гц.
6-22	4	Клемма 60, низкий ток входа, мА. Значение тока, которое соответствует минимальному значению задания
6-23	20	Клемма 60, высокий ток входа, мА. Значение тока, которое соответствует максимальному значению задания
6-24	0	Клемма 60, низкое значение обратной связи. Масштабирование аналогового входа. Градус Цельсия
6-25	200	Клемма 60, высокое значение обратной связи. Масштабирование аналогового входа. Градус Цельсия
6-26	0,01	Клемма 60, постоянная времени фильтра, секунды.
7-20	2	Обратная связь, клемма 60, управление процессом
7-30	0	Нормальный режим работы ПИ-регулятора (не инверсный)
7-31	1	Разрешен режим антираскрутки ПИ-регулятора.
7-32	0	Запуск ПИ регулятора при скорости двигателя, Гц
7-33	6 Расчетное (подбираемое) значение	Пропорциональный коэффициент усиления ПИ-регулятора процесса.
7-34	30 Расчетное (подбираемое) значение	Постоянная времени интегрирования ПИ-регулятора процесса.

Рисунок 3
 Электрическое подключение частотного преобразователя “DANFOSS”

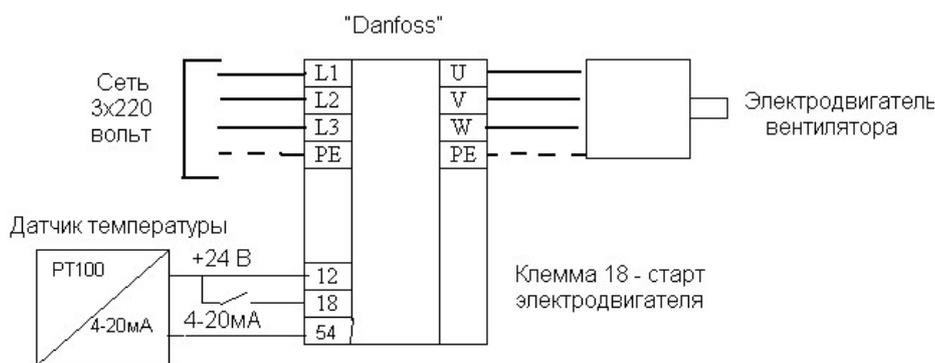


Таблица 2
 Параметрические значения частотного преобразователя “DANFOSS”

Номер параметра	Значение параметра	Пояснения
1-00	3	Режим работы- замкнутый контур управления
3-02	50	Минимальное задание (значение) регулируемого параметра, градус Цельсия
3-03	51	Максимальное задание (значение) регулируемого параметра, градус Цельсия
4-12	0	Нижний предел скорости вращения электродвигателя, Гц.

Таблица 2

Номер параметра	Значение параметра	Пояснения
4-14	50	Верхний предел скорости вращения электродвигателя, Гц.
6-22	4	Клемма 54, низкий ток входа, мА. Значение тока, которое соответствует минимальному значению задания
6-23	20	Клемма 54, высокий ток входа, мА. Значение тока, которое соответствует максимальному значению задания
6-24	0	Клемма 54, низкое значение обратной связи. Масштабирование аналогового входа. Градус Цельсия
6-25	200	Клемма 54, высокое значение обратной связи. Масштабирование аналогового входа. Градус Цельсия
6-26	0,01	Клемма 54, постоянная времени фильтра, секунды.
20-00	2	Источник обратной связи, клемма 54
20-02	60	Единица измерения источника обратной связи, градус Цельсия
20-12	60	Единица измерения задания обратной связи, градус Цельсия
20-81	0	Нормальный режим работы ПИД-регулятора (не инверсный)
20-93	7 Расчетное (подбираемое) значение	Пропорциональный коэффициент ПИД-регулятора.
20-94	20 Расчетное (подбираемое) значение	Интегральный коэффициент ПИД-регулятора
20-95	2 Расчетное (подбираемое) значение	Дифференциальный коэффициент ПИД-регулятора

Настройки ПИД- регулятора также как и в случае с «ОВЕН» приближенно рассчитывались по первому методу Ziegler-Nichols и корректировались в ходе эксперимента.

$$K_p = 1,2T / L$$

$$T_i = 2L$$

$$T_d = 0,5L$$

Результаты исследования

Результаты эксперимента с частотными преобразователями «ОВЕН» и “DANFOSS” представлены в таблице 3 и 4 соответственно.

Таблица 3

Результаты эксперимента с «ОВЕН»

Изменение напряжения на лампе, в	Установившаяся частота, Гц	Время стабилизации частоты вращ., с.
150 - 180	40 +/-2	12
180 - 220	45 +/-3	9
220 - 190	41 +/- 2	9
190 - 150	37 +/- 1	6
150 - 220	46 +/- 4	10
220 - 150	35 +/- 3	9

Таблица 4

Результаты эксперимента с “DANFOSS”

Изменение напряжения на лампе, в	Установившаяся частота, Гц	Время стабилизации частоты вращ., с.
150 - 180	40 +/-2	8
180 - 220	46 +/-3	8
220 - 190	41 +/- 2	7
190 - 150	37 +/- 3	8
150 - 220	43 +/- 6	9
220 - 150	35 +/- 5	10

Обсуждение

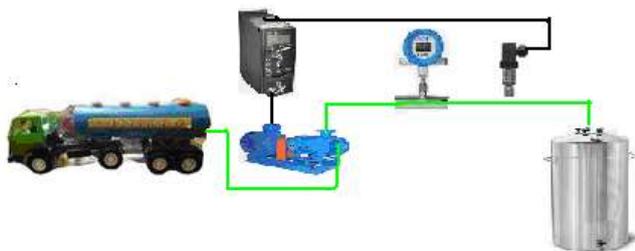
В перечисленных ранее работах (Maheswari, 2020; Sudjoko, 2020; Ramirez, 2018) отсутствуют сведения об использовании частотного преобразователя компании «ОВЕН». Результаты сравнительного исследования показывают, что частотный преобразователь компании «ОВЕН», имеющий в своей структуре ПИД-регулятор, успешно выполнил задачу по автоматическому регулированию температуры, также как и частотный преобразователь компании “DANFOSS”, имеющий в своей структуре ПИД-регулятор. Таким образом, частотный преобразователь для трехфазных электродвигателей компании «ОВЕН» можно использовать как альтернативу частотному преобразователю компании “DANFOSS” в качестве регулирующего устройства (Pangestu, 2019). Достоинствами технического ре-

нения, показанного в лабораторном стенде данной работы, можно считать простота реализации схемы управления, экономии материальных ресурсов на закупку средств автоматизации. К недостаткам можно отнести неудобства изменения значения регулируемого параметра. Однако, в некоторых производственных процессах значение регулируемого параметра остается неизменным длительное время (Кормаков, 1974)⁸. Также, например, заданное значение давления перекачиваемой патоки при ее учете или дозировании с помощью расходомера постоянно.

На рисунке 4 показана схема перекачки патоки через расходомер для ее учета. Так как температура разных партий продукта различна (соответственно и плотность), то для обеспечения точности измеряемого объема (или массы) продукта, пройденного через расходомер, требуется автоматическое регулирование скорости вращения вала электродвигателя насоса, чтобы обеспечить стабильное давление в учетном расходомере. Принципиальная схема лабораторного исследовательского стенда на рисунке 1 аналогична схеме перекачки патоки при ее учете или дозировании на рисунке 4. Такое построение системы управления соответствует требованиям ГОСТ 24.104-85 Автоматизированные системы управления. Общие требования.

Рисунок 4

Схема перекачки патоки, автоматическое регулирование давления в трубопроводе



Так как, частотные преобразователи компании «ОВЕН» дешевле аналогичных преобразователей компании «DANFOSS», то их использование является экономически оправданно и рекомендуется нами к расширенному использованию.

Список литературы

Алейников, А. К. (2018). *Основы автоматизации технологических процессов*. Саратовский ГАУ.

Бальхин, М. Г., Благовещенский, И. Г., Назойкин, Е. А., & Благовещенский, В. Г. (2019). Адаптивная система управления с идентификатором нестационарными технологическими процессами в отраслях пищевой промышленности. В *Интеллектуальные системы и технологии в отраслях пищевой промышленности*, (с. 32-39).

Бальхин, М. Г., Борзов, А. Б., & Благовещенский, И. Г. (2017). Архитектура и основная концепция создания интеллектуальной экспертной системы контроля качества пищевой продукции. *Пищевая промышленность*, (11), 60 - 63.

Бальхин, М. Г., Борзов, А. Б., & Благовещенский, И. Г. (2017). *Методологические основы создания экспертных систем контроля и прогнозирования качества пищевой продукции с использованием интеллектуальных технологий*. Издательство Франтера.

Благовещенская, М. М., Благовещенский, И. Г., & Назойкин, Е.А. (2015). Методика автоматической оценки качества пищевых изделий на основе теории искусственных нейронных сетей. *Пищевая промышленность*, (2), 42 - 45.

Благовещенская, М. М. (2009). *Основы стабилизации процесса приготовления многокомпонентных масс*. Издательство Франтера.

Благовещенская, М. М., Злобин, Л. А. (2005). *Информационные технологии систем управления технологическими процессами*. Высшая школа.

Грибанов, А. А., & Василенко, А. С. (2018). Нечеткое регулирование в автоматизации производственных процессов. *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*, 4(40), 297-300.

Крылова, Л. А., Благовещенский, В. Г., & Татарин, А. В. (2017). Разработка интеллектуальных аппаратно- программных комплексов мониторинга процессов сепарирования дисперсных пищевых масс на основе интеллектуальных технологий. В *Развитие пищевой и перерабатывающей промышленности России: кадры и наука*, (1), (с. 199-201).

Петряков, А. Н., Благовещенская, М. М., Благовещенский, В. Г., & Крылова, Л. А. (2018). Применение методов объектно- ориентированного программирования для контроля показателей качества кондитерской продукции. *Кондитерское и хлебопекарное производство*, 5-6(176), 21-23.

Решетняк, Е. П. (2010). *Функциональные схемы автоматизации оборудования по переработке молока*. Часть 1. Саратовский ГАУ.

Astrom, K. J. (2002). *Control System Design Lecture notes for ME 155A*. Department of Mechanical & Environmental Engineering University of

⁸ Кормаков, С. И., & Серебряков, М. Н. (1974). Справочник для рабочих шоколадного производства. Пищевая промышленность.

- California Santa Barbara. University of California Santa Barbara, (pp. 216–252).
- Calderon-Cordova, C., Chuquimarca-Carrillo, E., Salinas-Lliviganay, D., Salinas-Bravo, D., Rivera-Lituma, J., & Betancourth, C. R. (2018). Automation of a medicinal herb crusher machine applied to the small food industry. *Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, 1–7. <https://doi.org/10.23919/CISTI.2018.8399306>
- Carter, C. (2007). A turn of speed. *Engineer*, 293(7721), 39–42.
- Celebrating the VLT: the first frequency converter. (2014). *World Pumps*, 2014(3), 12–16. [https://doi.org/10.1016/s0262-1762\(14\)70045-8](https://doi.org/10.1016/s0262-1762(14)70045-8)
- Guo, X., Wu, Y., Li, G., Li, Sh., & Wen, Y. (2018). Motor-pump system based on optimized coordinated control. *Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA)*, 66 (3), 7.
- Kapovsky, B., Zakharov, A., & Nikitina, M. (2020). Intelligent control system for minced meat production. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 14, 750–758. <https://doi.org/10.5219/1342>
- Maheswari, K. T., Bharani Kumar, R., Lavanya, D., & Boopathimanikandan, S. (2020). Design of SVPWM based closed-loop control of voltage source inverter fed induction motor drive with PID controller. *Proceedings of the 4th International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*, 487–492. <https://doi.org/10.1109/ICISC47916.2020.9171181>
- Martin, J. (2008). Energy savings from inverter drives in the efficient building. *World Pumps*, (498), 32–34. [https://doi.org/10.1016/S0262-1762\(08\)70102-0](https://doi.org/10.1016/S0262-1762(08)70102-0)
- Pangestu, R., Harini, B., & Yusivar, F. (2019). Temperature control of air conditioning compressor system on electric vehicles, *4th IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*, 165–170.
- Patel, V. V. (2020). Ziegler-Nichols tuning method: Understanding the PID controller. *Resonance*, 25(10), 1385–1397. <https://doi.org/10.1007/s12045-020-1058-z>
- Ramirez, S., Zepeda, D. A., Cerda, J., & Torres, V. (2018). A PID controller comparative study of tuning methods for a three-phase induction motor speed control. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, 2238, 655–659.
- Schreitmüller, A., & Verdier, D. (2003). Dedicated frequency inverters for optimising the drinking water supply and the treatment of waste water. *Eau, l'INDUSTRIE, Les Nuisances*, 261, 55–57.
- Sindhuja, S., Abirami, P., Pushpavalli, M., & Sivagami, P. (2019). Implementation of multilevel inverter for controlling induction motor. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(1), 1164–1169.
- Sudjoko, R. I., Hartono, & Iswahyudi, P. (2020). Speed control of permanent magnet synchronous motor using universal bridge and PID controller. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 405–416. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4481-1_39
- Wang, S., Liang, H., & Wang, J. (2019). GA PID control research in inverter motor speed governing system. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, 19(2), 299–306. <https://doi.org/10.3233/JCM-180869>

Comparative study of frequency converters of three-phase electric motors in automatic control of technological parameter

Margarita M. Blagoveshchenskaya¹, Mikhail V. Veselov¹

¹ Moscow State University of Food Production, 11 Volokolamskoe highway, Moscow, 125080, Russian Federation

Correspondence concerning this article should be addressed to Margarita M. Blagoveshchenskaya, Moscow State University of Food Production, address: 11 Volokolamskoe highway, Moscow, 125080, Russian Federation, e-mail: mmb@mgupp.ru

Frequency converters of asynchronous three-phase AC motors are widely used in industry, including food production. A thorough understanding of the technical capabilities of frequency converters contributes to their efficient use. This article discusses a technical comparison of two frequency converters of three-phase electric motors of the Russian company "OWEN" and the Danish company "DANFOSS" according to the criterion of the quality of regulation of the technological parameter. For comparison, a test bench was created, in which the devices were tested in turn, under the same conditions. During the preparation and implementation of testing, it turned out that the hardware capabilities of frequency converters for their use in regulating technological parameters are the same, and the parametric capabilities are different. The frequency converter of the "OWEN" company is equipped with a PI controller, and the frequency converter from "DANFOSS" is equipped with a PID controller. As the results of testing the devices show, despite such a difference, with an appropriate setting, the frequency converter of the "OWEN" company is not inferior to the frequency converter of the "DANFOSS" company in terms of the quality of regulation of the technological parameter.

Key words: frequency converter of a three-phase electric motor, automatic control system, technological parameter of the production process.

References

- Aleinikov, A. K. (2018). *Osnovy avtomatizatsii tekhnologicheskikh processov* [Fundamentals of automated technological processes]. Saratov State Agrarian University.
- Balykhin, M. G., Blagoveshchensky, I. G., Nazoikin, E. A., & Blagoveshchensky, V. G. (2019). An adaptive control system with an identifier for non-stationary technological processes in the food industry. In *Intellektual'nye sistemy i tekhnologii v otraslyah pishchevoj promyshlennosti* [Intelligent systems and technologies in the food industry], (pp. 32-39).
- Balykhin, M. G., Borzov, A. B., & Blagoveshchensky, I. G. (2017). Architecture and basic concept of creating an intelligent expert system for food quality control. *Pishchevaya promyshlennost'* [Food industry], 11, 60 - 63.
- Balykhin, M. G., Borzov, A. B., & Blagoveshchensky I. G. (2017). *Metodologicheskie osnovy sozdaniya ekspertnykh sistem kontrolya i prognozirovaniya kachestva pishchevoj produkcii s ispol'zovaniem intellektual'nykh tekhnologij* [Methodological foundations for the creation of expert systems for monitoring and predicting the quality of food products using intelligent technologies]. Frantera.
- Blagoveshchenskaya, M. M., Blagoveshchensky, I. G., & Nazoikin, E. A. (2015). A technique for automatic assessment of the quality of food products based on the theory of artificial neural networks. *Pishchevaya promyshlennost'* [Food industry], 2, 42 - 45.
- Blagoveshchenskaya, M. M. (2009). *Osnovy stabilizatsii processa prigotovleniya mnogokomponentnykh mass* [Basics of stabilizing the process of preparing multicomponent masses]. Frantera.
- Blagoveshchenskaya, M. M., & Zlobin, L. A. (2005). *Informacionnye tekhnologii sistem upravleniya tekhnologicheskimi processami* [Information technology of technological process control systems]. Vysshaya shkola
- Gribanov, A. A., & Vasilenko, A. S. (2018). Fuzzy regulation in the automation of production processes.

How to Cite

Blagoveshchenskaya, M. M., Veselov, M. V. (2020). Comparative study of frequency converters of three-phase electric motors in automatic control of technological parameter. *Health, Food & Biotechnology*, 2(3). <https://doi.org/10.36107/hfb.2020.i3.s71>

- Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 4(40), 297-300.
- Krylova, L. A., Blagoveshchensky V. G., & Tatarinov, A. V. (2017). Development of intelligent hardware and software systems for monitoring processes of separation of dispersed food masses based on intelligent technologies. In *Razvitie pishchevoj i pererabatyvayushchej promyshlennosti Rossii: kadry i nauka* [Development of the food and processing industry in Russia: personnel and science], (pp. 199-201).
- Petryakov, A. N., Blagoveshchenskay, M. M., Blagoveshchensky, V. G., & Krylova, L. A. (2018). Application of object-oriented programming methods to control the quality indicators of confectionery products. *Konditerskoe i hlebopekarnoe proizvodstvo* [Confectionery and bakery production], 5-6(176), 21-23.
- Reshetnyak, E. P. (2010). *Funkcional'nye skhemy avtomatizatsii oborudovaniya po pererabotke moloka* [Functional diagrams of automation of milk processing equipment], Part 1. Saratov State Agrarian University.
- Astrom, K. J. (2002). *Control System Design Lecture notes for ME 155A*. Department of Mechanical & Environmental Engineering University of California Santa Barbara. University of California Santa Barbara, (pp. 216 – 252).
- Calderon-Cordova, C., Chuquimarca-Carrillo, E., Salinas-Lliviganay, D., Salinas-Bravo, D., Rivera-Lituma, J., & Betancourth, C. R. (2018). Automation of a medicinal herb crusher machine applied to the small food industry. *Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, 1-7. <https://doi.org/10.23919/CISTI.2018.8399306>
- Carter, C. (2007). A turn of speed. *Engineer*, 293(7721), 39-42.
- Celebrating the VLT: the first frequency converter. (2014). *World Pumps*, 2014(3), 12-16. [https://doi.org/10.1016/s0262-1762\(14\)70045-8](https://doi.org/10.1016/s0262-1762(14)70045-8)
- Guo, X., Wu, Y., Li, G., Li, Sh., & Wen, Y. (2018). Motor-pump system based on optimized coordinated control. *Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA)*, 66 (3), 7.
- Kapovsky, B., Zakharov, A., & Nikitina, M. (2020). Intelligent control system for minced meat production. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 14, 750-758. <https://doi.org/10.5219/1342>
- Maheswari, K. T., Bharani Kumar, R., Lavanya, D., & Boopathimanikandan, S. (2020). Design of SVPWM based closed-loop control of voltage source inverter fed induction motor drive with PID controller. *Proceedings of the 4th International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*, 487-492. <https://doi.org/10.1109/ICISC47916.2020.9171181>
- Martin, J. (2008). Energy savings from inverter drives in the efficient building. *World Pumps*, (498), 32-34. [https://doi.org/10.1016/S0262-1762\(08\)70102-0](https://doi.org/10.1016/S0262-1762(08)70102-0)
- Pangestu, R., Harini, B., & Yusivar, F. (2019). Temperature control of air conditioning compressor system on electric vehicles, *4th IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*, 165-170.
- Patel, V. V. (2020). Ziegler-Nichols tuning method: Understanding the PID controller. *Resonance*, 25(10), 1385-1397. <https://doi.org/10.1007/s12045-020-1058-z>
- Ramirez, S., Zepeda, D. A., Cerda, J., & Torres, V. (2018). A PID controller comparative study of tuning methods for a three-phase induction motor speed control. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, 2238, 655-659.
- Schreitmüller, A., & Verdier, D. (2003). Dedicated frequency inverters for optimising the drinking water supply and the treatment of waste water. *Eau, l'INDUSTRIE, Les Nuisances*, 261, 55-57.
- Sindhuja, S., Abirami, P., Pushpavalli, M., & Sivagami, P. (2019). Implementation of multilevel inverter for controlling induction motor. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(1), 1164-1169.
- Sudjoko, R. I., Hartono, & Iswahyudi, P. (2020). Speed control of permanent magnet synchronous motor using universal bridge and PID controller. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 405-416. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4481-1_39
- Wang, S., Liang, H., & Wang, J. (2019). GA PID control research in inverter motor speed governing system. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, 19(2), 299-306. <https://doi.org/10.3233/JCM-180869>