

## АДАПТИВНОЕ КВАЗИОПТИМАЛЬНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ С НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛЬЮ СИЛОВОЙ ЧАСТИ

**В.П.Войтенко**

**Черниговский национальный технологический университет,**

**ул. Шевченко, 95, Чернигов, 14027, Украина.**

**e-mail: [volodymyr.vovtenko@inel.stu.cn.ua](mailto:volodymyr.vovtenko@inel.stu.cn.ua)**

*Рассмотрен один из путей повышения эффективности электрически управляемых промышленных систем за счет улучшения их динамики в условиях ограничений на управляющие воздействия, а также повышения устойчивости к возмущениям и изменениям параметров. С этой целью использован квазиоптимальный алгоритм управления импульсным преобразователем, который совместно с объектом управления моделируется с помощью искусственной нейронной сети (ИНС). Проанализированы системы с реализацией регулятора в виде предвзвешенно обученной ИНС. Отмечены основные проблемы, связанные с имплементацией ИНС во встраиваемые системы. Приведены результаты моделирования. Бібл. 9, рис. 1.*

**Ключевые слова:** оптимальное управление, динамика импульсных преобразователей, искусственные нейронные сети.

Главный технический аспект, лежащий в основе экономики устойчивого развития, – это эффективное высокотехнологичное материальное производство, основанное на широком использовании автоматизированных систем управления и контроля. Цель данного исследования – разработка концепции построения и проверка алгоритма работы универсального промышленного регулятора, обеспечивающего заданную точность установления и поддержания требуемого параметра, минимальное время регулирования и отсутствие перерегулирования в условиях ограничений на затрачиваемые ресурсы.

В качестве промышленного объекта управления (ОУ) наиболее часто встречаются устройства преобразования вида энергии, например, – из электрической в тепловую или механическую. Для электрически управляемых процессов сигнал задания на регулирование представляет собой напряжение или ток. Регулируемый параметр ОУ, в зависимости от конкретного рассматриваемого процесса, может быть электрическим напряжением (током) – в системах преобразования электроэнергии; температурой – в технологических системах с нагревом рабочего тела; скоростью вращения или углом поворота вала электродвигателя вращательного движения (станкостроение, транспорт); скоростью или координатой перемещения активного элемента электродвигателя линейного движения (микроэлектроника, измерения); давлением рабочей среды в пневмо- и гидросистемах (деревообработка, пищевая промышленность), прочими параметрами. Несмотря на перечисленное многообразие, управление в указанных случаях возможно на основе универсальных принципов.

Важнейшим условием управляемости ОУ является однозначность функционала управления, связывающего его вход с выходом, и отсутствие последействия. Практически все реальные ОУ обладают динамическими свойствами. Кроме того, процесс даже нормальной эксплуатации ОУ неизбежно сопровождается старением, что приводит к изменению функционала управления с течением времени. И, наконец, в процессе работы с ОУ возможны возмущения, вызванные как аддитивными внешними воздействиями, непосредственно влияющими на регулируемый параметр, так и изменениями внутренних свойств (параметров) ОУ, что приводит к нестационарности системы. Хотя возмущения и можно предсказать с той или иной степенью точности и учесть в процессе управления, получаемый в результате процесс всегда отличается от идеализированного (ожидаемого). В итоге для электрически управляемых процессов функциональную зависимость состояния выхода ОУ (регулируемого параметра  $y(t)$ ) от состояния входа (сигнала задания  $x(t)$ ) можно представить в виде

$$y(t) = K \cdot F(x(t), w(t)) + z(t), \quad (1)$$

где  $K$  – масштабирующий коэффициент;  $|F(\dots)| \leq 1$  – нормированный функционал управления;  $w(t)$  – возмущения, вызванные изменениями внутренних свойств (параметров) ОУ;  $z(t)$  – возмущения вследствие аддитивных внешних воздействий.

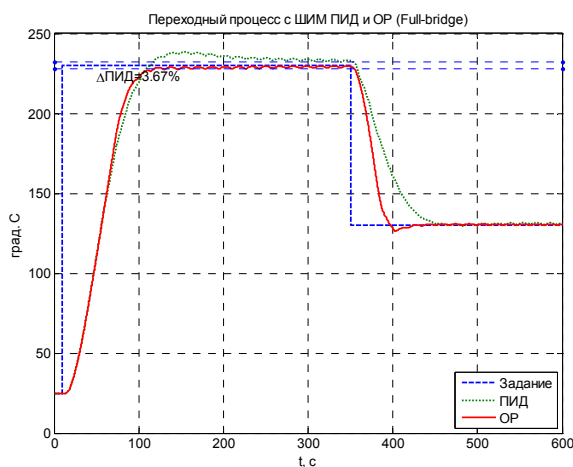
Из (1) следует структура универсальной системы управления, в которую, помимо ОУ и цифрового регулятора должны входить элементы, измеряющие (или оценивающие) аддитивное возмущение  $z(t)$ , и позволяющие скомпенсировать его с требуемой точностью. Кроме того, необходимо отслеживать параметрические возмущения  $w(t)$  и их влияние на поведение ОУ. Также часто приходится принимать во внимание факторы высокого порядка, что утяжеляет функциональные зависимости, связывающие выход ОУ с его входом. Следовательно, математическое описание поведения ОУ является всего лишь абстракцией, которая, тем не менее, позволяет повысить эффективность управления с точки зрения затрат времени и/или материальных ресурсов на ее реализацию.

Предлагаемый подход основывается на том, что практически любую промышленную систему можно представить с известной степенью точности в заданных границах в виде ее модели низкого (до третьего) порядка, достаточно хорошо отражающей важнейшие с точки зрения задачи управления свойства реального ОУ. В эту модель необходимо включить и силовой преобразователь. Знание коэффициентов передаточной функции такого

комплексного ОУ, имитирующего (1), будет достаточным условием для реализации многоступенчатой системы автоматического управления. Именно использование итерационного принципа грубого и точного регулирования обеспечивает решение проблемы точности. Проблема же быстродействия решается за счет применения оптимальных цифровых алгоритмов [4] в каждой ступени. Получение оптимального по быстродействию переходного процесса по одной из координат состояния одновременно может сопровождаться выходом других переменных за допустимые пределы, что вносит дополнительные ограничения на регулирование. В разрабатываемой универсальной системе с помощью предварительно обученной искусственной нейронной сети (ИНС) производится идентификация [8] подсистемы «импульсный преобразователь – неизвестная (в том числе – нелинейная) нагрузка», что позволяет выбрать структуру и коэффициенты адекватного эталонного регулятора [5] в условиях изменяющихся ограничений на уровни воздействия и при наличии возмущений.

Выбор ИНС обусловлен возможностью реализации широкого набора нелинейностей вида вход-выход, основываясь лишь на экспериментальных данных, что оказалось решающим в контексте создания универсального промышленного регулятора для управления разнообразными ОУ. Способность ИНС к обобщению обеспечивает настройку системы для работы в условиях, отличающихся от существовавших во время проектирования. Некоторые особенности применения ИНС пришлось учитывать для расширения возможностей использования разрабатываемого регулятора в случае управления таких ОУ, как двигатель постоянного тока (ДПТ). Оценка возможностей используемой встраиваемой системы на базе сигнального микроконтроллера позволила использовать ИНС только лишь в замкнутом внешнем контуре положения. Разработанный контроллер оценивает данные об обратной связи от модели ДПТ, которая построена также на основе ИНС.

Развитие описанного подхода привело к разработке вариантов алгоритмов квазиоптимального регулирования [1], позволяющих сократить требуемые вычислительные ресурсы и время регулирования в широком диапазоне заданий. В то же время, обучение ИНС остается нерешенной вычислительной проблемой для встраиваемых систем реального времени. Хорошо отработанные обучающие алгоритмы пока были реализованы в офлайн-режиме средствами ANN-toolbox в среде Matlab. В рассмотренном примере с ДПТ использована сеть прямого распространения для регулятора и нелинейная авторегрессионная сеть с экзогенными входами для аппроксимации связки импульсный преобразователь – нагрузка.



На основе системы регулирования температуры проанализированы особенности различных методов импульсной модуляции выходного напряжения преобразователя с точки зрения обеспечения приемлемой точности, а также возможности реализации встроенными аппаратными средствами сигнального микроконтроллера. На рисунке показаны переходные процессы в базовом ПИД- и квазиоптимальном регуляторе, который обеспечивает меньшую статическую и динамическую ошибку. Для повышения универсальности разрабатываемого регулятора также исследованы топологии импульсных преобразователей, обладающих наилучшей динамикой [6,7]. Применение в качестве электронного ключа квазирезонансного преобразователя, переключаемого при нулевом токе, позволило улучшить энергетические характеристики по сравнению с обычным широтно-импульсным преобразователем в широком диапазоне рабочих частот, что согласуется с [2]. Нерешенной осталась проблема реверсирования напряжения,

что несколько сужает сферы применения (универсальность) этого варианта системы и требует дополнительных исследований. Проанализирована элементная база и схемотехника импульсных преобразователей, даны практические рекомендации по выбору устройств сопряжения микроконтроллера с силовыми вентилями. С целью оптимизации значений параметров выходного фильтра (а точнее – минимизации емкости выходного конденсатора до величины, обеспечивающей требуемые уровни пульсаций выходного напряжения как в переходных, так и в стационарных режимах) использованы рекомендации [3]. Для дальнейших экспериментальных исследований разработаны промышленные регуляторы на основе сигнальных микроконтроллеров с возможностью оценки алгоритмов управления, формируемых средствами Matlab-Simulink, не прибегая к низкоуровневому программированию.

В результате проведенных исследований предложена концепция построения универсального промышленного квазиоптимального регулятора, в котором обеспечение требований по динамике и точности решается за счет итерационного подхода, причем на каждом уровне иерархии системы управления реализуется оптимальный алгоритм. Определение коэффициентов регулирования проводится путем офлайн-идентификации связки импульсный преобразователь – процесс. Устойчивость к внешним и параметрическим возмущениям обеспечивается за счет квазиоптимального регулятора на основе предварительно обученной ИНС. Разработан и проверен на моделях различных ОУ алгоритм работы, очерчены проблемы, требующие дальнейшего решения.

1. Войтенко В.П. Этапы алгоритма квазиоптимального регулирования в системе с импульсным преобразователем // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 3. – С. 125–126.
2. Городний А.Н. Анализ мощности рассеивания транзисторным ключом в последовательных импульсном и квази-резонансном преобразователях // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 3. – С. 75–76.
3. Руденко Ю.В. Переходные процессы в выходных цепях источника питания, работающего на нестационарную технологическую нагрузку // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 2. – С. 50–57.
4. Ту Ю. Современная теория управления. – Москва: Машиностроение, 1971. – 472 с.
5. Khomenko M., Voytenko V., Vagapov Y. Neural network-based optimal control of a DC motor positioning system // International Journal of Automation and Control. – 2013. – Vol. 7. – No 1/2. – Pp. 83–104. doi: 10.1504/IJAAC.2013.055097.
6. Denisov Y.O., Stepenko S.A., Gorodny A.N., Kravchenko A.O. Input current parameters analysis for PFC based on quasi-resonant and conventional boost converters // Proc. IEEE 34th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 15-18 April 2014. – Pp. 393–397. doi: 10.1109/ELNANO.2014.6873446
7. Liu K.-H., Oruganti R., Lee F.C.Y. Quasi-resonant converters-topologies and characteristics // IEEE Transactions on Power Electronics. – 1987. – Vol. PE-2. – No 1. – Pp. 62–71.
8. Peretz M.M., Ben-Yaakov S. Time-domain identification of pulse-width modulated converters // IET Power Electron. – 2012. – Vol. 5. – Iss. 2. – Pp. 166–172. doi: 10.1049/iet-pel.2010.0377

УДК 621.365.9:681.5.015:681.518.3

## АДАПТИВНЕ КВАЗІОПТИМАЛЬНЕ РЕГУЛЮВАННЯ В ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ З НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЮ МОДЕЛЛЮ СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ

**В.П.Войтенко**

**Чернігівський національний технологічний університет,**

**вул. Шевченка, 95, Чернігів, 14027, Україна. e-mail: [volodymyr.voytenko@inel.stu.cn.ua](mailto:volodymyr.voytenko@inel.stu.cn.ua)**

*Розглянуто один із шляхів підвищення ефективності промислових систем з електричним керуванням за рахунок покращення їхньої динаміки в умовах обмежень на керуючі впливи, а також підвищення стійкості до збурень і змін параметрів. З цією метою використано квазіоптимальний алгоритм керування імпульсним перетворювачем, який спільно з об'єктом керування моделюється за допомогою штучної нейронної мережі (ШНМ). Проаналізовано системи з реалізацією регулятора у вигляді попередньо навченої ШНМ. Окреслено основні проблеми, пов'язані з імплементацією ШНС у вбудовані системи. Наведено результати моделювання. Бібл. 9, рис. 1.*

**Ключові слова:** оптимальне керування, динаміка імпульсних перетворювачів, штучні нейронні мережі.

## ADAPTIVE QUASI-OPTIMAL CONTROL IN PULSE CONVERTORS WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORK MODEL OF POWER PART

**V.P.Voytenko**

**Chernihiv National University of Technology,**

**95, Shevchenko str., Chernihiv, 14027, Ukraine. e-mail: [volodymyr.voytenko@inel.stu.cn.ua](mailto:volodymyr.voytenko@inel.stu.cn.ua)**

*It is considered the one way of increasing the efficiency of electrically controlled industrial systems by means of improving their dynamics in the conditions of restrictions on control actions, as well as increasing of resistance to disturbances and changes in the parameters. For this purpose a quasi-optimal control algorithm is used for pulse converter, which together with a plant is simulated by using of artificial neural network (ANN). It is analyzed the system with implementation of the controller in the form of pre-trained ANN. The basic problems associated with implementation of the ANN in embedded systems are discussed too. Simulated results of investigations are given. References 9, figure 1.*

**Key words:** optimal control, dynamics of power converters, artificial neural networks.

1. Voitenko V.P. Algorithm stages of quasi-optimal regulation in system with a pulse converter // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2012. – No 3. – Pp. 125–126. (Rus)
2. Gorodnyi A.N. Analyzing of transistor switch dissipation power in sequential type switched-mode and quasi-resonant zero current switch converters // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2012. – No 3. – Pp. 75–76. (Rus)
3. Rudenko Yu.V. Transient processes at the power supply output circuits which operates with non-stationary technological load // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2013. – No 2. – Pp. 50–57. (Rus)
4. Tou J.T. Modern Control Theory. – McGraw-Hill Education, 1964. – 427 p.
5. Khomenko M., Voytenko V., Vagapov Y. Neural network-based optimal control of a DC motor positioning system // International Journal of Automation and Control. – 2013. – Vol. 7. – No 1/2. – Pp. 83–104. doi: 10.1504/IJAAC.2013.055097.
6. Denisov Y.O., Stepenko S.A., Gorodny A.N., Kravchenko A.O. Input current parameters analysis for PFC based on quasi-resonant and conventional boost converters // Proc. IEEE 34th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 15-18 April 2014. – Pp. 393–397. doi:10.1109/ELNANO.2014.6873446
7. Liu K.-H., Oruganti R., Lee F.C.Y. Quasi-resonant converters-topologies and characteristics // IEEE Transactions on Power Electronics. – 1987. – Vol. PE-2. – No 1. – Pp. 62–71.
8. Peretz M.M., Ben-Yaakov S. Time-domain identification of pulse-width modulated converters // IET Power Electron. – 2012. – Vol. 5. – Iss. 2. – Pp. 166–172. doi: 10.1049/iet-pel.2010.0377

Надійшла 03.02.2016  
Остаточний варіант 12.07.2016