

## АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ РЕАКТИВНО-ИМПУЛЬСНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ И РАСХОДА ЖИДКОСТИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОПРИВОДА

© 2012 В. Я. Свербилов, Д. М. Стадник, В. Н. Илюхин, Д. В. Шамина

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

На основе анализа литературных источников в статье рассмотрены новые методы и средства повышения эффективности гидропривода за счёт использования дискретных реактивно-импульсных регуляторов давления и расхода. Показаны преимущества новых методов в сравнении с традиционными, даны примеры их использования в технике мобильного гидропривода, а также проблемы на пути их более широкого применения.

*Коммутлируемое инерционное устройство (КИУ), энергоэффективность, инерционная трубка, усилитель потока и давления.*

Гидравлические приводы находят широкое применение во всех отраслях промышленности в составе силовых систем мобильных и стационарных объектов, в системах управления летательных аппаратов. Благодаря высокой удельной мощности гидропривод значительно легче электропривода, обладает высоким быстродействием и хорошей управляемостью. Несмотря на непрерывное совершенствование характеристик электропривода, его удельная мощность на сегодняшний день, как правило, на порядок ниже, чем у гидропривода. Поэтому применение гидропривода для высоконагруженных объектов в обозримом будущем не имеет альтернативы.

Важной проблемой, возникающей при разработке и эксплуатации гидравлического привода машин и оборудования различного назначения, особенно энергонагруженных, является минимизация энергетических затрат. Применяемый в настоящее время принцип пропорционального регулирования, основанный на дросселировании потока жидкости, не удовлетворяет современным требованиям по экономичности. Кроме того, клапаны могут служить только для понижения расхода и давления, а не для их повышения. Этот метод аналогичен использованию мощных потенциометров или реостатов для управления скоростью электромотора путём снижения тока и напряжения; такой расточительный метод не может быть приемлем сегодня.

Существует несколько альтернативных методов регулирования давления или расхода жидкости.

1. Насосы и моторы переменной производительности. Это очень эффективный и широко распространённый метод. Однако такие насосы и моторы дороги и могут возникнуть проблемы с их управлением из-за люфтов и трения, особенно при нулевом расходе.

2. Сервомотор с регулируемой скоростью [1, 2]. Это становится всё более возможным благодаря достижениям в области силовой электроники, но ограничением является скорость реакции.

3. Гидромеханический трансформатор [3]. Такие устройства достаточно сложны, дорогостоящи и широко не используются.

Тенденции развития гидропривода в направлении повышения энергетической эффективности и одновременного снижения габаритов и массы привели к появлению новых методов и средств управления потоком рабочей жидкости. Эти методы основаны на использовании дискретной техники. Клапаны дискретного действия относительно просты, дешёвы и надёжны. По данным зарубежных источников применение таких средств позволяет повысить КПД гидропривода на десятки процентов.

Один из новых методов – метод реактивно-импульсного регулирования. Он основан на использовании реактивных свойств, присущих компонентам гидравлических систем. Так, объём полости, заполненный жид-

костью, обладает податливостью и представляет собой емкостную компоненту системы, участки трубопроводов и каналы обладают инерционными свойствами и образуют индуктивные компоненты. На основе электродинамических аналогий можно создавать гидромеханические импульсные системы управления, подобные тем, что давно и эффективно применяются в электротехнике. В таких регуляторах отсутствуют потери энергии на дросселирование потока, а в качестве элементов управления используются дискретные распределители – наиболее простые и дешевые компоненты – аналоги электрического ключа.

Поток жидкости, обладающий механической инерционностью, быстро перенаправляется между линиями питания и дренажа, или, в других случаях, - между линиями выхода и нагрузки. Механическая податливость жидкости используется для фильтрации колебаний или формирования динамических характеристик. В тех случаях, когда выходное давление пропорционально входному давлению, или выходной расход пропорционален входному расходу, получается «гидравлический трансформатор». В других, когда выходной расход пропорционален входному давлению, реализуется «гидравлический гиратор» (или фазовращатель) [4]. Иногда можно также провести прямые аналогии гидравлических систем с другими современными конверторами электрической энергии, как правило, с некоторой модификацией. Обзор методов дискретного регулирования гидравлических систем приведен в [5], где изложены принципы работы, компоненты и системные аспекты.

Приложения, использующие механическую податливость и инерционность, можно найти в [6, 7], где описан простейший распределитель, который может использоваться как гидравлический трансформатор. Инерционный эффект создается инерцией массы. Много примеров рассмотрено в [8-10], здесь действие основано на инерции гидромотора и нагрузки.

Приложения, использующие податливость и инерционность жидкости, приведены в [11-14]. В этих приложениях используются разные варианты распределителя. Это могут быть двух-, трёх- или четырёхходовые кла-

паны с одной или двумя инерционными трубками. Как правило, используются две схемы усиления - либо давления, либо расхода на выходе.

Подобные методы и средства частотно-импульсного управления давно и эффективно используются в электротехнике. Напряжение и ток в электрических системах можно трансформировать (ступенчато повышать или снижать), используя комбинации коммутаторов, катушек индуктивности и конденсаторов. Аналогично этому, в гидравлических системах можно повышать или понижать давление или расход при высоком значении кпд.

Принцип работы трёхканального коммутируемого инерционного устройства (КИУ) подробно рассмотрен в работе [12]. Это устройство позволяет менять расход и давление без рассеивания энергии. КИУ может обеспечить повышение или понижение давления или расхода подобно гидравлическому трансформатору.

Трёхканальное КИУ может работать в двух режимах. В одном режиме оно функционирует как усилитель расхода и редуктор давления; в другом - как редуктор расхода и усилитель давления. КИУ состоит из быстродействующего распределителя и длинной инерционной трубки малого диаметра. Распределитель имеет три порта: один общий и два коммутируемых. Общий порт соединяется поочередно - то с одним переключаемым портом, то с другим. Когда один переключаемый порт соединён с общим, другой порт закрыт. Общий порт соединяется с инерционной трубкой. В этом случае инерционная трубка действует подобно маховику в механической системе, заставляя поток продолжать движение без подвода энергии извне.

Схема усилителя расхода и эквивалентная электрическая цепь приведены на рис. 1. В электрической цепи в качестве коммутатора используются полупроводниковые устройства. Инерционная трубка в гидравлической системе играет роль катушки индуктивности в электрической цепи. В качестве нагрузки в гидравлической системе может быть гидравлический цилиндр или мотор.

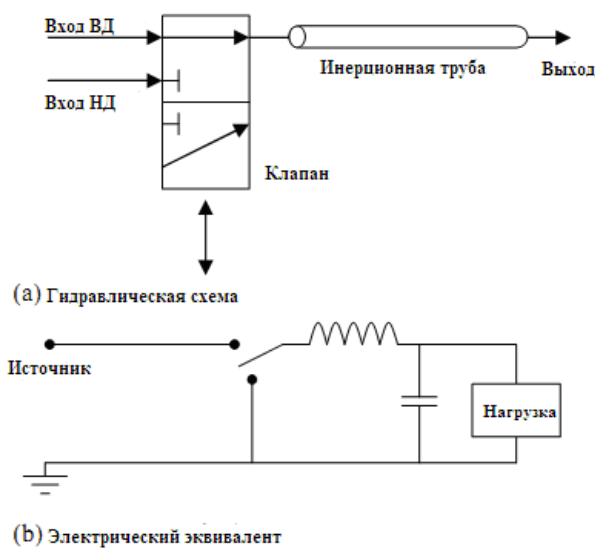


Рис. 1. Схема реализации усилителя расхода [12]

Входная линия высокого давления соединяется с насосом или пневмогидравлическим аккумулятором, линия низкого давления – с гидравлическим баком или с обратной линией. Выходной канал присоединён к нагрузке. Распределитель переключается циклически и быстро, так что входы ВД и НД (питания и слива) открываются поочередно. Когда клапан открыт в линию ВД, поток направляется в линию подачи, приобретая высокую скорость в инерционной трубке. Когда клапан переключается в линию низкого давления, поток, сохраняя количество движения, засасывает жидкость из канала низкого давления, несмотря на обратный градиент давления. Во время этой фазы жидкость будет замедляться, и расход немного уменьшится, как показано на рис. 2. Так как у клапана длительность цикла мала (около 5 миллисекунд) уменьшение расхода из-за торможения невелико.

Расход через вход высокого давления ( $Q_{ВД}$ ) принимает форму ряда импульсов (вкл – выкл), в то время как расход на выходе ( $Q_{ВЫХ}$ ) относительно постоянен и примерно равен расходу ( $Q_{ВД}$ ) во время цикла «вкл», как показано на рис. 2. Расход через вход низкого давления ( $Q_{ВНД}$ ) также принимает форму импульсов. Таким образом, средний расход по входу высокого давления будет меньше, чем средний расход на выходе. При этом давление на выходе станет ниже, чем давление на входе, в канале высокого давления.

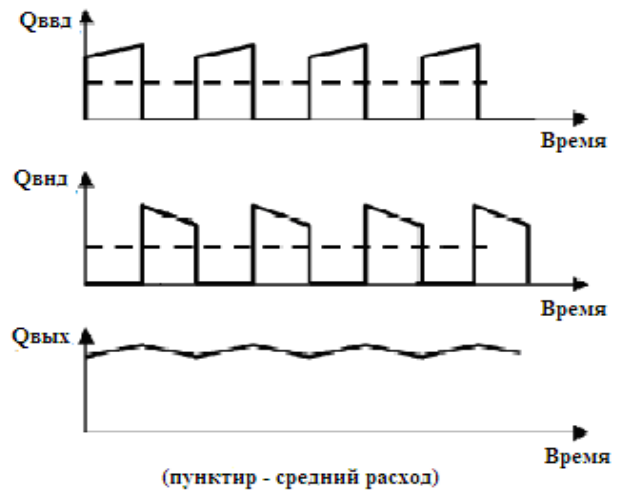


Рис. 2. Идеализированный процесс усиления расхода [12]

Регулируя отношение времени открытия канала высокого давления ко времени открытия канала низкого давления, выходные расход и давление можно изменять. Теоретически для идеальной работы со 100%-м КПД соотношение между выходным расходом и расходом через впускной канал высокого давления можно рассчитать по формуле (1):

$$Q_{ВЫХ} = \frac{Q_{ВД}}{x}, \quad (1)$$

где  $Q_{ВЫХ}$  - расход на выходе;

$Q_{ВД}$  - расход через вход высокого давления;

$x$  - часть цикла клапана, в течение которого он открыт для впускного канала высокого давления ( $0 < x < 1$ ).

Соотношение между выходным давлением и высоким входным давлением при идеальной работе определяется формулой

$$P_{ВЫХ} = xP_{ВД} + (1 - x)P_{ВНД}, \quad (2)$$

где  $P_{ВЫХ}$  - давление на выходе;

$P_{ВД}$  - высокое давление;

$P_{ВНД}$  - низкое давление.

Если  $x$  уменьшается, то выходной расход растёт, но выходное давление падает. На практике фактические значения выходного расхода и давления будут меньше, чем идеальные величины, из-за утечек и потерь на трение. Кроме того, в системе возникают пульсации потока, что может потребовать применения средств выравнивания потока, таких как гидравлический аккумулятор.

Схема дискретного усилителя давления показана на рис. 3. Здесь впускной канал соединён с линией высокого давления. Выходной канал подключен к нагрузке с высоким давлением, а сливной - канал к гидравлическому баку с низким давлением. Клапан переключается быстро и циклически, поочередно открывая выпускной или сливной канал. Рассмотрим ситуацию, когда давление в линии питания равно среднему между выходным и сливным давлениями. Когда клапан открывается в слив, поток из линии питания идёт на слив, и жидкость в инерционной трубке ускоряется, т.к. давление на входе больше давления слива. Когда клапан открыт для выпускного канала, поток идёт из линии питания к выпускному каналу. Давление в выпускном канале больше, чем давление во впускном канале, поэтому поток в инерционной трубе тормозится. Принцип действия показан на рис. 4.

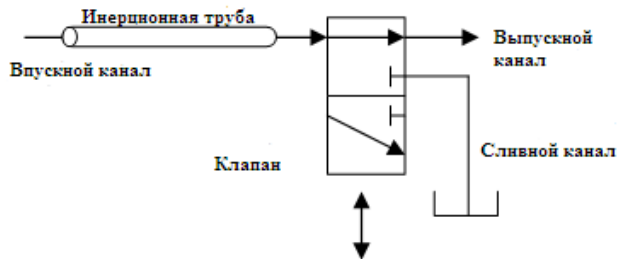


Рис. 3. Схема реализации усилителя давления [12]

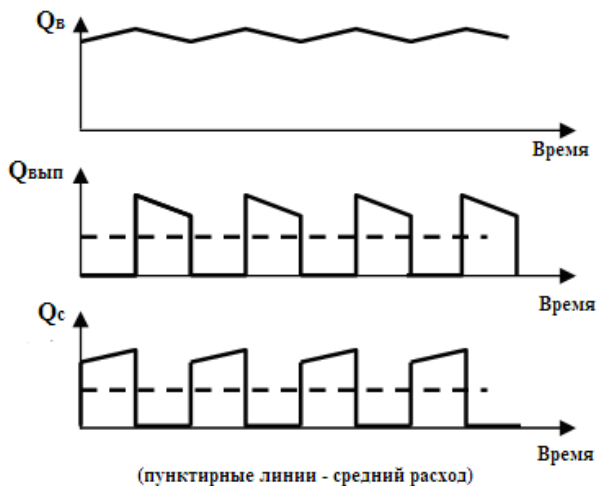


Рис. 4. Работа усилителя давления [12]

Регулируя степень открытия клапана, можно менять выходной расход и давление. Идеальное соотношение между средним выходным и входным расходом определяется соотношением (3), где  $x$  - это часть цикла

клапана, в течение которого он открыт для выпускного канала ( $0 < x < 1$ ):

$$Q_{ВЫХ} = xQ_{ВХ}, \quad (3)$$

где  $Q_{ВХ}$  - расход на входе.

Соотношение между выходным и входным давлением при идеальной работе имеет вид:

$$P_{ВЫХ} = \frac{P_{ВХ}}{x} - \frac{(1-x)P_C}{x}, \quad (4)$$

где  $P_{ВХ}$  - входное давление;

$P_C$  - давление слива.

С уменьшением  $x$  выходной расход уменьшается, а давление увеличивается.

До настоящего времени гидравлическое импульсное управление изучалось и развивалось лишь небольшим количеством исследователей групп. Первые исследования в США [4, 15] были опубликованы в конце 80-х. Публикации европейских исследовательских групп начались в 90-х годах. В работах [14, 16 - 21] представлены принципиальные основы нового класса технологий гидравлического управления. Большинство этих публикаций представляют основные концепции, результаты моделирования или первые прототипы (рис. 5).

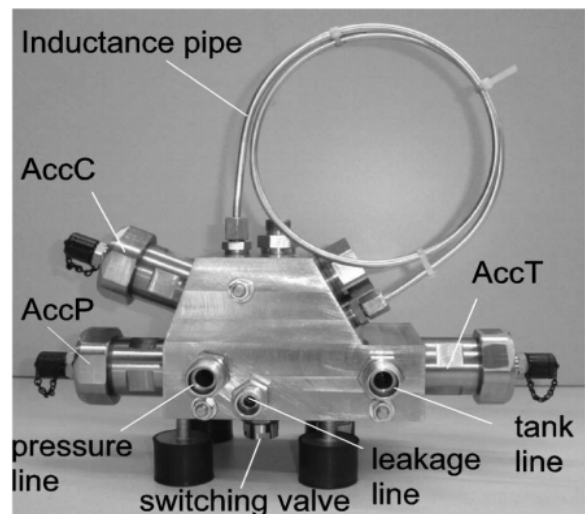


Рис. 5. Прототип компактного коммутлируемого инерционного устройства (КИУ) [22]

В [23] представлена конструкция КИУ (рис. 6), в котором распределители, обратные клапаны и аккумуляторы линий питания уже объединены в блоке, но гидравлическая индуктивность и аккумулятор со стороны потребителя установлены отдельно. Основа интегрированной конструкции составляют компактные распределители и обратные кла-

паны, а также компактные аккумуляторы или гасители пульсаций. В целом компактный дизайн не только способствует интеграции устройства в машину или транспортное средство, но также важен для улучшения КПД и снижения шума. Эти аспекты рассмотрены в [24, 25]. Алгоритмы управления движением линейного привода на основе импульсной техники управления представлены в работах [13, 26].

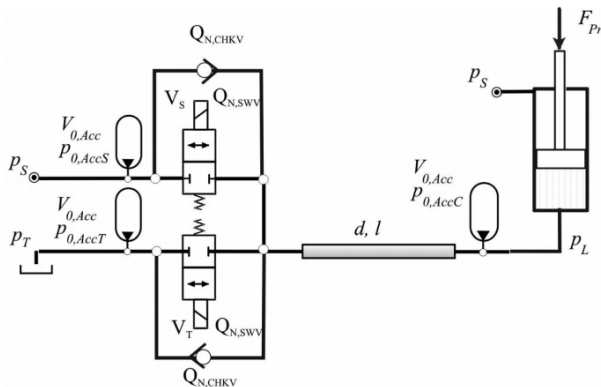


Рис. 6. Схема КИУ для управления линейным приводом [25]

КИУ может использоваться в нескольких компоновках в зависимости от требуемых режимов работы гидравлических систем.

- Для формирования источника постоянного давления. Это необходимо для обеспечения параллельной работы разных устройств от общего источника питания, например, на экскаваторе, где для ковша и стрелы могут потребоваться отдельные каналы управления.
- Для обеспечения переменного расхода от насоса постоянной производительности. Это может потребоваться для управления скоростью гидромотора или лебёдки.
- Для получения переменного давления от источника постоянного давления. Это может быть использовано для управления скоростью и усилием одного или нескольких исполнительных устройств, питающихся от источника постоянного давления, таких как ковш и стрела на экскаваторе.

Впервые подобные коммутируемые инерционные устройства с их электрическими эквивалентами были описаны Брауном в конце 80-х [4]. Одно такое четырёхканальное

коммутируемое инерционное устройство роторного типа было разработано и исследовано в работе [5]. Авторы использовали его в конфигурации, эквивалентной четырёхканальному модулирующему распределителю. Однако при работе устройства были выявлены серьёзные проблемы шума и малой эффективности. Поэтому в дальнейшем этот принцип не развивался.

В настоящее время с развитием вычислительных мощностей и техники быстродействующих клапанов возрос интерес к проведению дальнейших исследований в этом направлении, особенно ввиду современных требований к энергетической эффективности и конкуренции со стороны электропривода, который стремится занять место гидравлики во многих приложениях.

Проблемы шума и эффективности могут быть разрешены благодаря более совершенной конструкции не только клапана. В работах ученых британского университета г. Бат предложено использовать активные методы снижения пульсаций [27]. Показано, что применение современных технологий на основе пьезоэлектрических усилителей - преобразователей с новыми алгоритмами управления позволяют обеспечивать высокую скорость переключения клапана и, вместе с тем, активное подавление пульсаций давления и шума.

Другой эффективный путь решения проблемы шума состоит в применении корректирующих устройств пассивного типа. Это метод управления пульсационными процессами в трубопроводных системах развит в работах СГАУ (Шорин В.П., Шахматов Е.В., Гимадиев А.Г. и др.) [28, 29]. В настоящее время проводятся совместные исследования ученых СГАУ и университета г. Бат в направлении разработки энергетически эффективных и малошумных гидравлических систем при финансовой поддержке правительств обеих стран. Актуальность выбранного направления подтверждается и финансовой поддержкой со стороны крупных компаний (Instron, Parker, JCB). Если проблемы пульсаций и шума будут преодолены, то сфера применения дискретных технологий управления и экономическая выгода будут огромными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы".

### **Библиографический список**

1 Cleasby, K. G. A novel high efficiency electrostatic flight simulator motion system / Plummer, A.R // *FPMC* /. Bath, Sept.2008 — pp. 437—449.

2 Todeschi, M., Flight Control Actuation Lessons Learned on EHAs Design [Text] / M. Todeschi // *Recent Advances in Aerospace Actuation Systems and Components*. — Toulouse, France, 2007. — pp. 21—26.

3 Vael, G.E.M, Achten, P.A.J., Fu, Z, 2000, "The Innas Hydraulic Transformer, the Key to the Hydrostatic Common Pressure Rail" [Text] / *SAE Paper 2000-01-2561*

4 Brown, F.T. Switched reactance hydraulics, a new way to control fluid power [Text] / F. T Brown // *National Conference on Fluid Power*. — Chicago, USA, 1987. — pp. 25—34.

5 Scheidl, R. Hydraulic switching control : principles and state of the art [Text] / R. Scheidl // *Workshop on Digital Fluid Power*. — Tampere, Finland, 2008.

6 Scheidl, R. Switching type control of hydraulic drives : a promising perspective for advanced actuation in agricultural machinery [Text] / R. Scheidl, M. Garstenauer // *Society of Automotive Engineers*. — vol., 109, 2000.

7 Scheidl, R. The role of resonance in elementary hydraulic switching control [Text] / R. Scheidl, M. Garstenauer // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I- Journal of Systems and Control Engineering*. — vol., 217, 2003. — pp. 469—480.

8 Hettrich, H. Speed controlled, energy efficient fan drive within a constant pressure system [Text] / F. Bauer, F. Fuchshumer // *The Second Workshop on Digital Fluid Power*. — Linz, Austria, 2009.

9 Cao, J. Research on electro-hydraulic control of propellers of the underwater vehicles with switch-mode hydraulic power supply [Text] / L. Gu, F. Wang // *ASME International*

*Mechanical Engineering Congress and Exposition*. — Chicago, Illinois, USA, 2006.

10 Wang, F. Research on deep-sea electric power generation technique from seawater pressure [Text] / F. Wang, L. Gu, // *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. — Seattle, Washington, USA, 2007.

11 Brown, F.T. A Hydraulic Rotary Switched-Inertance Servo-Transformer [Text] / S.C. Tentarelli, // *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the ASME*. — vol. 110, pp. 144-150, Jun 1988.

12 Johnston, D.N. A Switched Inertance Device for Efficient Control of Pressure and Flow [Text] / D.N. Johnston // *Dynamic Systems and Control Conference / Hollywood, California, USA, 2009*.

13 Kogler, H. Simulation tools and control design for fast switching hydraulic systems [Text] / H. Kogler, B. Manhartgruber // *The Second Workshop on Digital Fluid Power / Linz, Austria, 2009*.

14 Kogler, H. Two basic concepts of hydraulic switching converters [Text] / H. Kogler, R. Scheidl // *The First Workshop on Digital Fluid Power / Tampere, Finland, 2008*.

15 Scheidl, R. Basics for the Energy-Efficient Control of Hydraulic Drives by Switching Techniques [Text] / R. Scheidl, D. Schindler, G. Riha [et al.] // *Proc. 3rd Conference on Mechatronics and Robotics / Stuttgart, 1995*.

16 Gall, H. Ansteuerungskonzept zur Energieeinsparung bei hydraulischen Linearantrieben [Text] / Gall H., K. Senn // *FreilaufVentile - Olhydraulik und Pneumatik № 38 / 1994, PP. 38-43*.

17 Scheidl, R. On Fluid Power Control by Switching Techniques [Text] / Scheidl R., A.S. Abo El Lail, D. Schindler // *Proc. Joint Hungarian-British Int. Mechatronics Conf. / Budapest, 1994. - PP. 551-556*.

18 Scheidl, R. Realisierung von Schalttechniken für hydraulische Antriebe. [Text] / R. Scheidl // *Elektrotechnik und Informationstechnik № 113, 1996, PP. 553-558*.

19 Scheidl, R. Energy Efficient Switching Control by a Hydraulic 'Resonance- Converter' [Text] / R. Scheidl, G. Riha., C.R. Burrows [et al.] // *Proc. Workshop on Power Transmission*

and Motion Control (PTMC'99) / Bath, 1999. - PP. 267-273.

20 J. Dantlgraber. Hydro-Transformer. European patent application (PCT) Intern. Publication No. WO 00/08339, 2000.

21 Johnston, D.N. Switched Inertance Device for Efficient Control of Pressure and Flow [Text] / D.N. Johnston // Proc. ASME/Bath Fluid Power Symposium at 2nd Annual Dynamic Systems and Control Conference / Hollywood, CA, USA, 2009.

22 Kogler, H. A Compact Hydraulic Switching Converter for Robotic Applications [Text] / H. Kogler, R. Scheidl, M. Ehrentraut [et al.] // Fluid Power and Motion Control (FPMC 2010) / Bath, UK, 2010. - PP. 55-68.

23 Scheidl, R. The Hydraulic Buck Converter - Concept and Experimental Results [Text] / R. Scheidl, B. Manhartgruber, H. Kogler [et al.] // International Fluid Power Conference / Dresden, 2008.

24 Scheidl, R. State of the Art in Hydraulic Switching Control - Components, Systems, Applications [Text] / R. Scheidl, B. Manhartgruber, G. Mikota [et al.] // Proc. Ninth Scandinavian International Conference on Fluid Power (SICFP'05) / Linköping, Sweden, 2005.

25 Scheidl, R., Basic problems in fast hydraulic switching valve technology [Text] / R. Scheidl, B. Steiner, B. Winkler B. [et al.] // Proc. Sixth Internat. Conference on Fluid Power Transmission and Control (ICFP05) / Hangzhou, China, 2005.

26 Kogler, H. Flatness Based Control of a Fast Switching Hydraulic Drive [Text] / H. Kogler, B. Winkler, R. Scheidl // 2nd International Conference on Computational Methods in Fluid Power / Aalborg, Denmark. 2006.

27 Pan, M. Active Control of Pressure Pulsation in a Switched Inertance Hydraulic Systems Using a Rectangular-Wave Reference Signal [Text] / M. Pan, D.N. Johnston, A. Hillis // Proc. Fluid Power and Motion Control Symposium (FPMC 2012) / Bath, UK, 2012. - PP. 165-177.

28 Шорин, В.П. Устранение колебаний в авиационных трубопроводах [Текст] / В.П. Шорин - М.: Машиностроение, 1980. - 156 с.

29 Снижение колебаний и шума в пневмогидромеханических системах [Текст] / А. А. Иголкин, А.Н. Крючков, Г.М. Макарьянц [и др.] - Самара, СГАУ, 2005. - 314 с.

## SWITCHED- REACTANCE CONTROL OF PRESSURE AND FLOW AS A WAY TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY OF HYDRAULIC DRIVES – A STATE-OF THE-ART REVIEW

© 2012 V. Ya. Sverbilov, D. M. Stadnik, V. N. Iliukhin, D. V. Shamin

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

The paper presents a state-of-the-art review of new methods and means to increase energy efficiency of hydraulic drives by usage of a switched-reactance control of pressure and flow. Advantages of the new methods in compare with traditional ones are revealed, examples of their application are given. There are also shown challenges on the way of their wider application.

*Switched inertance device (SID), energy efficiency, inertance tube, flow and pressure booster arrangement.*

### Информация об авторах

**Свербилов Виктор Яковлевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: v.sverbilov@mail.ru. Область научных интересов: динамика топливных систем, динамика регуляторов давления, подавление пульсаций в трубопроводных цепях.

**Стадник Дмитрий Михайлович**, аспирант, инженер кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sdm-63@bk.ru. Область научных интересов: моделирование систем регулирования давления газа, динамика регуляторов давления.

**Илюхин Владимир Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: iwNIK@yandex.ru. Область научных интересов: мехатроника и робототехника, исследование динамических характеристик цифровых регуляторов.

**Шамин Дмитрий Валерьевич**, студент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: dimmin08@yandex.ru. Область научных интересов: моделирование систем регулирования давления газа, динамика регуляторов давления.

**Sverbilov Viktor Yakovlevich**, candidate of technical science, associate professor of automatic systems of power plants, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: v.sverbilov@mail.ru. Area of research: dynamics of fuel systems, dynamic of gas pressure control valve, suppression of pulsations in piping circuits.

**Stadnik Dmitry Mikhailovich**, graduate, engineer of department automatic systems of power plants. Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: sdm-63@bk.ru. Area of research: system modeling gas pressure control, dynamic of gas pressure control valve.

**Iliukhin Vladimir Nikolaevich**, candidate of technical science, Associate Professors, Department of Control Systems of Power Units, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: iwNIK@yandex.ru. Area of research: mechatronics and robotics, digital fluid power.

**Shamin Dmitry Valerievich**, student, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: dimmin08@yandex.ru. Area of research: system modeling gas pressure control, dynamic of gas pressure control valve.