

# Модификация адаптивной системы для подавления влияния шумов

А.Н. Заворин  
ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия)

**Аннотация:** Адаптивное управление широко применяется для управления объектами, изменяющими свои параметры в ходе своего функционирования. Один из способов построения таких систем состоит в использовании тестовых девиаций, которые вводятся в сигнал либо в какой-либо коэффициент регулятора [1]. Решающее устройство в такой системе анализирует ее качество на основании наперед заданного критерия, и изменяет регулятор с целью достижения наилучшего качества управления (в соответствии с этим критерием). Недостатком такой системы является наличие переходных процессов даже в том случае, если качество системы соответствует предъявляемым к ней требованиям. Обсуждается метод устранения этого недостатка.

**Ключевые слова:** Автоматика, регулятор, моделирование, теория автоматического управления, численная оптимизация, устойчивость, качество переходного процесса, адаптивные системы, самонастраивающиеся системы.

## ВВЕДЕНИЕ

Адаптивные системы требуются для управления нестационарными динамическими объектами, что актуально во многих отраслях промышленности, техники, технологии и науки. В них осуществляются соответствующие изменения коэффициентов регулятора для обеспечения неизменных свойств системы в целом, вопреки изменениям свойств объекта. Например, если коэффициент усиления объекта уменьшается, то коэффициент усиления регулятора должен увеличиться, и наоборот. Если изменяется несколько коэффициентов объекта, то столь однозначной связи между этими изменениями и требуемыми изменениями регулятора иногда не существует. Поэтому задача адаптивного управления состоит из двух подзадач: определения изменений коэффициентов динамических объектов и вычисления требуемых изменений коэффициентов регулятора. Количество изменяемых коэффициентов объекта может быть различным. Количество изменяемых коэффициентов регулятора, как правило, не превышает трех, поскольку наиболее распространенный вид регулятора имеет три тракта воздействия на объект:

пропорциональный, интегрирующий и дифференцирующий, в зависимости от того действия, которое этот тракт осуществляет по отношению к ошибке управления.

Например, в [1, с.71, рис.47] описана одна из таких адаптивных систем. Существенным недостатком этой адаптивной системы является низкое быстродействие и недостаточная точность. Для эффективной работы системы требуется оценка модели объекта в широком диапазоне частот, что и приводит к снижению быстродействия и, как следствие, к ухудшению точности, а также повышает сложность системы. Для расчета регулятора адаптивная система использует информацию о многих значениях амплитудно-частотной характеристики в относительно широком диапазоне частот. Эта информация снимается в последовательном режиме, а именно используется генератор гармонических сигналов по заданной программе, который должен изменять частоту генерируемого сигнала под управлением анализатора характеристик. Каждый полный цикл измерения требует значительного времени. Необходимость охвата широкого частотного диапазона вызывает необходимость формирования тестовых сигналов и в рабочей области частот, в которой такие помехи нежелательны, поскольку они ухудшают точность системы.

Известна также адаптивная система, описанная в [2, с.443, рис.4.40]. Основным недостатком этой адаптивной системы является невозможность ее реализации для большинства реальных объектов управления, поскольку объект управления зачастую содержит элемент запаздывания, что детально описано в [3]. Другим недостатком данного устройства является недостаточное быстродействие. Необходимость точного определения многих коэффициентов объекта управления с помощью анализатора сигналов вынуждает конструировать его на основе использования корреляционных методов, в которых высокая точность достигается лишь в случае чрезвычайно длительного осреднения результатов, особенно в присутствии возмущающего воздействия. Поэтому высокая точность определения коэффициентов объекта управления в анализаторе сигналов может быть достигнута лишь с низким быстродействием, а недостаточная точность определения этих коэффициентов не позволяет осуществить эффективную работу контура адаптации. Таким образом, актуальна разработка адаптивных

систем, обладающих достаточно высоким быстродействием при достаточной эффективности.

### 1. ВОЗМОЖНЫЕ ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ

Для повышения быстродействия адаптивной системы разработана система, описанная в [3]. Одной из ее особенностей является использование результатов предварительного исследования, направленного на разработку набора регуляторов, у которых математическая модель задается единственным входным параметром.

Во многих практических случаях все множество получаемых вариантов настройки управляемого регулятора может быть упорядочено вдоль оси единственного условного параметра  $K$ . Например, для этого может быть построена зависимость коэффициентов интегрирующего и дифференцирующего тракта от коэффициента пропорционального тракта, после чего эти зависимости могут быть аппроксимированы плавными кривыми линиями, например, методом полиномиальной аппроксимации. Даже если эти зависимости не однозначны, то есть одному значению параметра  $K$  соответствует несколько значений коэффициентов, в ряде случаев среднее значение этих коэффициентов может успешно использоваться в качестве коэффициентов управляемого регулятора. Данное соображение

подтверждается модельным исследованием и может быть продемонстрировано практическими примерами. Пример и метод отыскания таких зависимостей даны в статье [4] (графики зависимостей даны на рис.7 и 8 этой статьи). В итоге получаем зависимость всей группы коэффициентов регулятора от единственного входного параметра  $K$ . Если такую зависимость получить не удалось, то предлагаемая в [3] адаптивная система не применима к управлению таким объектом управления.

После отыскания указанной зависимости коэффициентов регулятора от единственного параметра  $K$  адаптивная система строится по следующей структурной схеме: основной контур управления образуется объектом и регулятором. Контур адаптации образуется остальными элементами [3]. На рис. 1 показана схема предложенной в [3] адаптивной системы.

Вычислитель № 1 вычисляет интеграл от модуля ошибки на скользящем интервале в соответствии с соотношением:

$$F(t) = \int_{t-T}^t |e(\tau)| d\tau. \quad (1)$$

Здесь  $T$  - интервал осреднения,  $t$  - текущее время,  $e(\tau)$  - ошибка управления,  $\tau$  - величина, аналогичная времени (обозначена другим символом для того, чтобы отличать ее от времени, используемом для обозначения границ интервала интегрирования).

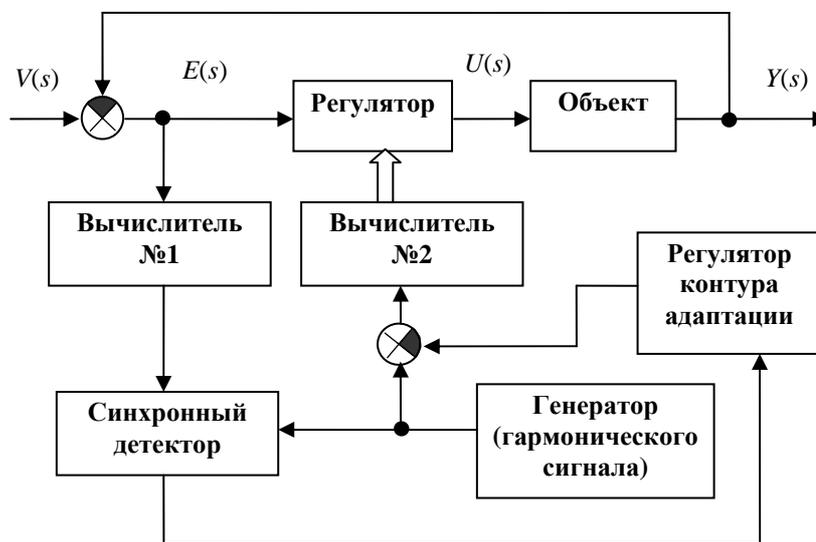


Рис. 1. Структурная схема адаптивной системы по [3]

Вычислитель № 2 вычисляет значения коэффициентов регулятора по заранее заданным функциям:

$$K_{II} = f_1(K), \quad (2)$$

$$K_{II} = f_2(K), \quad (3)$$

$$K_D = f_3(K). \quad (4)$$

Синхронный детектор осуществляет умножение двух сигналов, приходящих на его входы и фильтрацию результата.

Все элементы системы, кроме объекта управления, могут быть реализованы на микроконтроллере, оснащенный АЦП на каждом входе и ЦАП на каждом выходе.

Эта адаптивная система для регулирования и стабилизации физических величин работает следующим образом.

В исходном состоянии математическое описание объекта управления известно, и это позволяет изначально настроить управляемый регулятор, то есть задать его коэффициенты. Также известна математическая модель объекта в виде передаточной функции с коэффициентами в виде алгебраических переменных, а также диапазон изменения всех этих коэффициентов. Как сказано выше, желательно свести все возможные изменения регулятора к функции одной переменной.

На практике часто встречаются случаи, когда указанные коэффициенты модели регулятора изменяются совместно, например, когда все они зависят от одного внешнего параметра, например температуры. В этом случае эта известная связь может использоваться для определения зависимости, связывающей наиболее эффективные коэффициенты регулятора с формальным параметром  $K$ . Это позволяет перестраивать все коэффициенты регулятора одновременно и синхронно по различным зависимостям (2) – (4), определенным предварительно. В этом случае настройка управляемого регулятора сводится к двум задачам: 1) к предварительной реализации аппаратной или программной зависимости этих функций; 2) к отысканию во время действия системы оптимального значения параметра  $K$  и использование этого параметра для изменения параметров настройки регулятора по указанным зависимостям.

Первоначальную настройку обозначим  $K_0$ .

В ходе работы адаптивной системы вследствие действия неизвестных внешних факторов и воздействий коэффициенты объекта управления изменяются, что нарушает качество настройки управляемого регулятора. Качество настройки оценивается вторым вычислителем, который осуществляет вычисление наперед заданной функции  $F(t)$ , например, интеграла от модуля ошибки за фиксированное время (1). Также могут быть использованы модифицированные стоимостный функции, например, такие, как предложено в работах [5–13].

Поскольку величина ошибки зависит от качества адаптивной системы, а следовательно, и от качества настройки управляемого регулятора, и поскольку коэффициенты управляемого регулятора зависят от параметра  $K$ , следовательно и величина критерия качества (1) зависит от значения этого параметра  $K$ . Первоначальная настройка управляемого регулятора осуществляется за счет установки начального состояния регулятора контура адаптации (РКА). Выходное значение сигнала этого РКА, поступая на вход первого вычислителя через второе вычитающее устройство, задает выходные значения этого первого вычислителя, которые и определяют коэффициенты управляемого

регулятора. Генератор, воздействуя через второе вычитающее устройство на вход первого вычислителя, заставляет его вычислять новые значения коэффициентов управляемого регулятора, которые изменяются в небольших пределах по периодическому закону, например, по гармоническому закону. Период частоты модуляции, формируемой генератором, должен быть существенно (не менее чем в 10 раз) больше, чем время интегрирования  $T$ . В итоге функция (1), вычисляемая вторым вычислителем, также изменяет свои значения по периодическому закону, синхронно с изменениями выходного сигнала генератора. Синхронный детектор осуществляет умножение этой функции с выхода второго вычислителя на сигнал модуляции, формируемый генератором, а результат усредняет во времени. Получаемый выходной сигнал через РКА и второе вычитающее устройство воздействует на вход первого вычислителя, заставляя его изменять вычисляемые коэффициенты в ту сторону, которая соответствует наименьшему среднему значению функции (1). Контур адаптации работает по принципу экстремальной системы автоматического регулирования, то есть системы, настраивающейся на минимум целевой функции (1). В результате работа этого контура обеспечивает минимальное значение целевой функции (1). Достижение минимального значения этой функции соответствует наилучшей настройке управляемого регулятора основного контура. В результате этот регулятор оказывается настроенным по критерию минимума целевой функции (1), что обеспечивает достижение устойчивости, наилучшего быстродействия этого основного контура управления, а, следовательно, и наилучшее качество всей адаптивной системы.

В отличие от адаптивной системы, описанной в [2, с. 443, рис. 4.40], в данной адаптивной системе не требуется вычисление статистическими методами точной математической модели объекта, изменяющейся во времени. Предварительные вычисления зависимостей  $K_{П}$ ,  $K_{И}$  и  $K_{Д}$  от  $K$  могут быть осуществлены методом математического моделирования, например, с использованием программ *MATLAB* или *VisSim*, как в работе [4]. Таким образом, данная адаптивная система отличается повышенным быстродействием за счет того, что в ней осуществляется единственная поисковая процедура для трех коэффициентов, и при этом не решается задача идентификации всей модели объекта во всем частотном диапазоне, а вместо этого определяется лишь приращение стоимостной функции.

При действии данной адаптивной системы не требуется вычисления и реализации обратной передаточной функции по отношению к передаточной функции объекта управления. Поэтому если объект управления содержит элемент запаздывания, это никак не препятствует эффективному действию предлагаемой

адаптивной системы. Поэтому данная адаптивная система может быть применена и к таким объектам, которые содержат элемент запаздывания, к которым не может быть применена адаптивная система, описанная в [2, с. 443, рис. 4.40].

Все устройство, кроме объекта управления, может быть реализовано на микроконтроллере с соответствующим количеством входов и выходов и с АЦП на всех входах и ЦАП на всех выходах. Расчет зависимости коэффициентов регулятора от параметра  $K$  может быть осуществлен, например, как это обеспечено в статье [4].

## 2. ДАЛЬНЕЙШАЯ МОДИФИКАЦИЯ СИСТЕМЫ

Одним из недостатков рассмотренной системы является рост целевой функции при любом качестве системы. Действительно, если даже система настроена наилучшим образом, в системе присутствует, как минимум, динамическая



Рис. 2. Структурная схема вычислителя № 2

Данная структура позволяет исключить рост целевой функции в случае, когда ошибка меньше той величины, которая заранее принята незначительной.

Кроме того, в целевую функцию можно рекомендовать введение детектора роста ошибки, который также называют «детектором неправильных движений» [10, 14]. Этот детектор строится на основе произведения ошибки управления на ее производную, указанное произведение должно быть отрицательным. Если это произведение положительно, это означает, что ошибка управления растет по величине. На взгляд автора, название «детектор роста ошибки» более корректно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному заданию №2014/138, тема проекта «Новые структуры, модели и алгоритмы для прорывных методов управления техническими системами на основе наукоемких результатов интеллектуальной деятельности».

## ЛИТЕРАТУРА

[1] В.А.Жмудь, Д.О.Герешкин, «Обоснование новой классификации адаптивных систем автоматического регулирования» в сборнике «Труды семинара по автоматике и программной инженерии, посвященном 40-летию юбилею ОАО «Новосибирский институт программных систем»,

ошибка, порождаемая действующими на объект возмущениями.

В любой реальной системе имеется не только допустимый максимальный уровень ошибки, но и некоторый настолько малый уровень, относительно которого можно утверждать, что если ошибка не превышает этот уровень, то ее можно считать практически равной нулю. Иными словами, некоторая достаточно малая ошибка может считаться настолько незначительной, что отличие ее от нуля также не существенно. Интегрирование выпрямленной ошибки в этом случае не должно давать положительной величины. Целесообразно, чтобы интеграл от этой величины был равен нулю.

Поэтому целесообразно ввести усилитель с зоной нечувствительности между выходом вычитающего устройства, вычисляющего ошибку, и вычислителем №1.

Этот усилитель также может быть введен в состав этого вычислителя. Пример структуры такого вычислителя показан на Рис. 2.

Новосибирск, 2012 г. URL: [http://www.nips.ru/images/stories/pdfs/Pros\\_NIPS-2012.pdf](http://www.nips.ru/images/stories/pdfs/Pros_NIPS-2012.pdf)

- [2] К.П. Власов. Теория автоматического управления. Учебное пособие. Харьков: Издательство Гуманитарный центр. 2007.
- [3] В.А.Жмудь, О.Д.Ядрышников, А.Н.Заворин, А.В. Полищук. Адаптивная система для регулирования и стабилизации физических величин. Патент на изобретение № 2522899. МПК G05D 1/00 (2006.01). Заявка № 2012152697. Приоритет от 06.12.2012. Зарегистрировано в реестре изобретений РФ 21.05.2014. Срок действия до 06.12.2032. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ.
- [4] В.А. Жмудь А.В. Полищук. Расчет множества коэффициентов регуляторов для объекта с двумя нестационарными параметрами, Сборник научных трудов НГТУ, 2012, № 3(69), стр.59-70.
- [5] А.А. Воевода, В.А. Жмудь. Сходимость алгоритмов оптимизации регулятора для объекта с ограничителем и с запаздыванием. Научный вестник НГТУ. - 2007. - N 4(29). с.179-184.
- [6] V. A. Zhmud. The Use of the Feedback Control Systems in Laser Physics Researching Experiments. // Proceedings of RFBR and DST Sponsored "The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics", 10 – 13 September, 2011, Additional volume, pp.40–43.
- [7] The modeling tests of the new PID-regulators structures. Voevoda, A.A., Zhmud, V.A., Ishimtsev, R.Y., Semibalamut, V.M. 2009. Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2009. P.165 – 168.
- [8] Modern key technologies in automatics: Structures and numerical optimization of regulators. Zhmud, V., Yadrishnikov, O., Poloshchuk, A., Zavorin, A. 2012.

- Proceedings - 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012.
- [9] The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program vissim 5.0/6. Zhmud, V., Liapidevskiy, A., Prokhorenko, E. 2010. Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control. PP. 27–32.
- [10] V. Zhmud, O. Yadrishnikov. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function. Proceedings of the 8-th International Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST-2013), vol. II, 28 June – 1 July. Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia. IEEE organized. 2013. P. 265 – 270. <http://www.must.edu.mn/IFOST2013/>
- [11] V. Zhmud, A. Polishchuk, A. Voevoda, R. V. Rao. The Tuning of the PID-Regulator for Automatic Control System of Thermo Energetic Equipment // Proceedings of the Fifth International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME-2011), June 06-08, 2011. Surat – 395 007, Gujarat, India. pp. 254-263.
- [12] В.А. Жмудь, А.Н. Заворин. Метод проектирования энергосберегающих регуляторов для сложных объектов с частично неизвестной моделью. В кн.: Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XVI Международной конференции 30 июня – 03 июля 2014 г., Самара. Россия. С. 557–567.
- [13] Zhmud V.A., Zavorin A.N. Metodi di ottimizzazione del controllo numerico su una modelli troncati. Italian Science Review. 2014; 4(13). PP. 686-689. Available at URL: <http://www.ias-journal.org/archive/2014/april/Zhmud.pdf> and <http://www.ias-journal.org/archives/april-2014>
- [14] Жмудь В.А., Ядрышников О.Д. Численная оптимизация ПИД-регуляторов с использованием детектора правильности движения в целевой функции. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 24–29. ФБГОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия). [http://nips.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=451:-q-q-3&catid=165:-q-q&Itemid=437](http://nips.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=451:-q-q-3&catid=165:-q-q&Itemid=437)



**Александр Николаевич Заворин** – аспирант кафедры Автоматики НГТУ, автор более 17 научных статей. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, оптимальные и адаптивные системы, оптимизация, многоканальные системы.  
E-mail: [pisatel1987@mail.ru](mailto:pisatel1987@mail.ru)

### Modification of the Adaptive System for More Effective Noise Suppression

A.N. ZAVORIN

*Abstract:* Adaptive control is widely used to control objects, changing their parameters during its operation. One way of constructing such systems consists in using test deviations that are introduced into the signal, or in any coefficient of the regulator [1]. Decisive device in this system analyzes the

quality of the system on the basis of the criterion given beforehand, and changes the regulator to achieve the best quality of the control (according to these criteria). The disadvantage of this system is the presence of transient processes, even if the quality of the system corresponds to the requirements set for it. The paper discusses a method for eliminating of this drawback.

*Key words:* Automation, control, simulation, automatic control theory, numerical optimization, stability, quality of the transition process, adaptive systems, self-adjusting system.

### REFERENCES

- [1] V.A.Zhmud, D.O.Tereshkin. "Justification of the new classification, adaptive cruise control", in "Proceedings of the Seminar on automation and software engineering, dedicated to the 40th anniversary of JSC" Novosibirsk Institute of Software Systems ", Novosibirsk, 2012 URL: [http://www.nips.ru/images/stories/pdfs/Pros\\_NIPS-2012.pdf](http://www.nips.ru/images/stories/pdfs/Pros_NIPS-2012.pdf)
- [2] K.P. Vlasov. Automatic Control Theory. Textbook. Kharkov: Publishing Center for the Humanities. 2007.
- [3] V.A. Zhmud, O.D. Yadrishnikov, A.N. Zavorin, A.V. Polishchuk. Adaptive system for the regulation and stabilization of physical quantities. The patent for the invention № 2522899. IPC G05D 1/00 (2006.01). Application № 2012152697. priority from 06.12.2012. Registered in the Register of Inventions of the Russian Federation 05.21.2014. Valid until 06/12/2032. Rightholder VPO NSTU.
- [4] V.A. Zhmud, A.V. Polishchuk. Calculation of the coefficients of the set of controllers for non-stationary object with two parameters, Collection of Scientific Papers NSTU, 2012, № 3 (69), p.59-70.
- [5] A.A. Voevoda, V.A. Zhmud. The convergence of the optimization algorithms for object control with limiter and delay. Scientific Bulletin of the NSTU. - 2007. N4(29). p.179-184.
- [6] V. A. Zhmud. The Use of the Feedback Control Systems in Laser Physics Researching Experiments. // Proceedings of RFBR and DST Sponsored "The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics", 10 – 13 September, 2011, Additional volume, pp.40–43.
- [7] The modeling tests of the new PID-regulators structures. Voevoda, A.A., Zhmud, V.A., Ishimtsev, R.Y., Semibalamut, V.M. 2009. Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling. ASM 2009. P.165 – 168.
- [8] Modern key technologies in automatics: Structures and numerical optimization of regulators. Zhmud, V., Yadrishnikov, O., Poloshchuk, A., Zavorin, A. 2012. Proceedings - 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012.
- [9] The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program vissim 5.0/6. Zhmud, V., Liapidevskiy, A., Prokhorenko, E. 2010. Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control. PP. 27–32.
- [10] V.A. Zhmud, O.D. Yadrishnikov. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function. Proceedings of the 8-th International Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST-2013), vol. II, 28 June – 1 July. Mongolian

- University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia. IEEE organized. 2013. P. 265 – 270. <http://www.must.edu.mn/IFOST2013/>
- [11] V. Zhmud, A. Polishchuk, A. Voevoda, R. V. Rao. The Tuning of the PID-Regulator for Automatic Control System of Thermo Energetic Equipment // Proceedings of the Fifth International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME-2011), June 06-08, 2011. Surat – 395 007, Gujarat, India. pp. 254-263.
- [12] V.A. Zhmud, A.N. Zavorin. Method of designing energy-efficient controllers for complex objects with partially unknown model. Proc.: The control and modeling in complex systems. Proceedings of the XVI International Conference June 30 - July 3, 2014, Samara. Russia. S. 557-567.
- [13] Zhmud V.A., Zavorin A.N. Metodi di ottimizzazione del controllo numerico su una modelli troncati. Italian Science Review. 2014; 4(13). PP. 686-689. Available at URL: <http://www.ias-journal.org/archive/2014/april/Zhmud.pdf> and <http://www.ias-journal.org/archives/april-2014>
- [14] V.A. Zhmud, O.D. Yadryshnikov. Numerical optimization of PID-controllers using the proper motion detector in the objective function. Automation and Software Engineering. 2013. № 1 (3). S. 24-29. FBGOU VPO NSTU (Novosibirsk, Russia). [http://nips.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=451:-qq-3&catid=165:-q-q&Itemid=437](http://nips.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=451:-qq-3&catid=165:-q-q&Itemid=437)