

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-129-139

## MATHEMATICAL MODEL OF RANDOM PROCESSES OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS

**V. A. Dorovskoy, E. G. Zinchenko, K. S. Chernobai**

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russian Federation

*The probabilistic-statistical description operates with the concepts and terms of probability theory and mathematical statistics, such as the mean value, variance or standard deviation, probability density, standard error. The purpose of the research is to build a mathematical model of random processes in automatic control systems. When modeling noise impacts, it is advisable to simulate noise as the normal white noise, which has a constant spectral density. The values of this spectral density can be obtained in practice from the spectrum of the random component of the control error and the complex transmission coefficients of the automatic control systems through the control and disturbance channels. As a result, the automatic control systems developer and the technologist are interested in the value of the root-mean-square control error. But to determine it, it is more convenient to use the spectral-temporal description of the automatic control systems. The peculiarity of noise (random processes) is that it is impossible to explicitly write down the dependence of their magnitude as a function of time, since the noise values change in different ways at each time interval. But you can specify some average values, named above, which give a fairly detailed idea of the noise as a whole. The noises often encountered in engineering practice are ergodic, such that the ensemble averaging coincides with the time averaging. Therefore, the statistical characteristics of such noises can be obtained by averaging their observed values over time.*

*Keywords: mathematical model, random processes, automatic control system.*

### For citation:

Dorovskoy, Vladimir A., Elena G. Zinchenko, and Kirill S. Chernobai. "Mathematical model of random processes of automatic control systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 129–139. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-129-139.

УДК 681.5

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В СТРУКТУРЕ СЭУ

**В. А. Доровской, Е. Г. Зинченко, К. С. Чернобай**

Керченский государственный морской технологический университет,  
Керчь, Российская Федерация

*Целью исследования является построение математической модели случайных процессов систем автоматического регулирования. Отмечается, что при моделировании шумовых воздействий полезной является модель шума в виде нормального белого шума, имеющая постоянную спектральную плотность. Значения этой спектральной плотности можно получить на практике по спектру случайной составляющей ошибки регулирования и комплексным коэффициентам передачи системы автоматического регулирования по каналам управления и возмущения. В итоге разработчика системы автоматического регулирования и технолога интересует значение среднеквадратической ошибки регулирования, для определения которой удобнее пользоваться спектрально-временным описанием системы автоматического регулирования. Подчеркивается, что особенность шумов (случайных процессов) состоит в том, что записать в явном виде зависимость их величины как функции времени невозможно, поскольку на каждом временном интервале значения шума изменяются различным образом, однако можно указать некоторые усредненные значения, дающие достаточно подробное представление о шуме в целом. Акцентируется внимание на том, что часто*

встречающиеся в инженерной практике шумы являются эргодическими, т. е. такими, у которых усреднение по ансамблю совпадает с усреднением по времени. Поэтому статистические характеристики таких шумов можно получить при помощи усреднения по времени их наблюдаемых значений.

*Ключевые слова:* математическая модель, случайные процессы, система автоматического регулирования.

**Для цитирования:**

Доровской В. А. Математическая модель случайных процессов систем автоматического регулирования в структуре СЭУ / В. А. Доровской, Е. Г. Зинченко, К. С. Чернобай // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 129–139. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-129-139.

## Введение (Introduction)

Вероятностно-статистическое описание оперирует понятиями и терминами теории вероятностей и математической статистики, такими как среднее значение, дисперсия или стандартное отклонение, плотность вероятности и среднеквадратическая ошибка. Детерминированный (определенный) сигнал представляет собой достаточно гладкий сигнал, значение которого известно или можно с некоторой точностью предсказать на некоторый интервал времени вперед и его поведение аналогично поведению идентичного сигнала в течение определенного промежутка времени. Это может быть полностью известный заранее сигнал (например, синусоидальный) с заданными частотой, амплитудой и начальной фазой или ступенчатый с известным моментом времени, когда происходит его изменение с определенной величиной ступени, и др. Шум представляет собой случайное изменение некоторой физической величины.

Предсказать значение шума даже на небольшой интервал вперед можно только с некоторой степенью вероятности и то не всегда. Аддитивная помеха — это шум, прибавляющийся, например, посредством механизма *принципа суперпозиции*, к детерминированному сигналу, несущему информацию, и искажающий его. Шумы (случайные процессы) описываются двумя взаимно связанными, но, на первый взгляд, существенно отличающимися способами: это спектрально-временное описание и вероятностно-статистическое описание шумов [1]–[3].

Спектрально-временное описание, основанное на наблюдении поведения шума, с течением времени ориентировано на определении таких характеристик случайного процесса, как средняя мощность, корреляционная функция и спектральная плотность. Вероятностно-статистическое описание оперирует понятиями и терминами теории вероятностей и математической статистики, такими как среднее значение, дисперсия или стандартное отклонение, плотность вероятности, среднеквадратическая ошибка.

*Целью исследования* является построение математической модели случайных процессов систем автоматического регулирования.

## Методы и материалы (Methods and Materials)

*Спектрально-временное описание шумов.* Наглядным представлением поведения шума с течением времени является осциллограмма (рис. 1). Значения шума первого источника изменяются сравнительно быстро, второго источника медленнее, а третьего еще медленнее. Четвертый источник выдает сигнал с медленно и в небольших пределах изменяющимися по случайному закону частотой, амплитудой и начальной фазой, близкий к синусоидальному, поэтому он называется *узкополосным*.

Сигналы первых трех источников шума получены фильтрацией нормального белого шума НЧ фильтрами Баттерворта 2-го порядка с усилением, равным единице, и полосами пропускания 100 рад/с, 10 рад/с и 5 рад/с. Узкополосный шум получен пропусканием белого нормального шума через колебательное звено с постоянной времени, равной 0,5 с, и декрементом затухания, равным  $7,07 \cdot 10^{-4}$ , или (что то же самое) с резонансной частотой 2 рад/с и высокой добротностью, равной 1414.

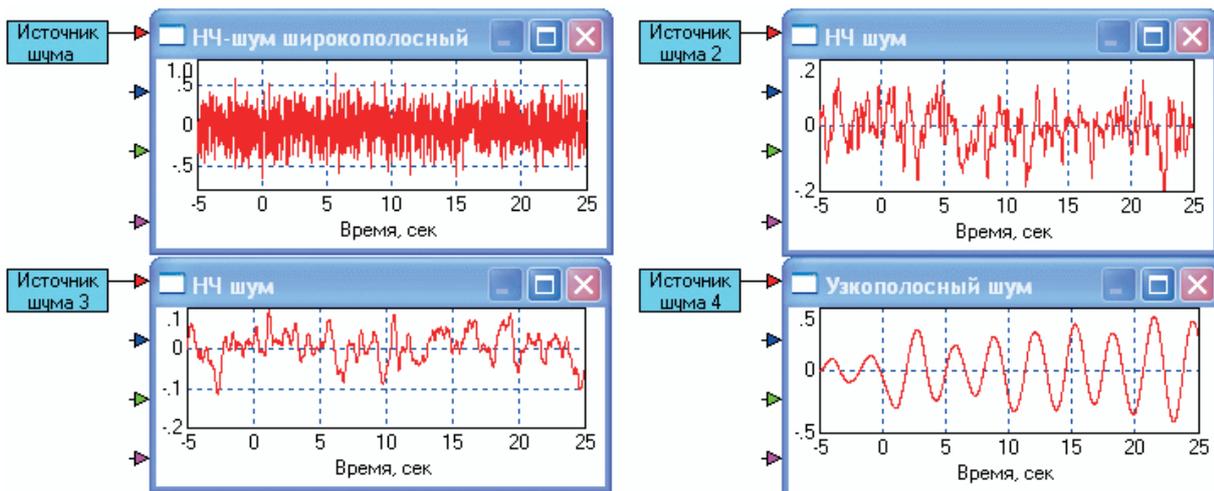


Рис. 1. Примеры осциллограмм узкополосного (источник 4) и низкочастотных шумов

Как видно, осциллограмма позволяет приблизительно оценить максимальные значения шумов, а также характерное время их изменения, хоть и весьма приблизительно [4]–[7]. Следует отметить, что на осциллограммах приведены так называемые *конкретные реализации шумов*, которые на другом интервале времени будут выглядеть похоже, но все-таки иначе. Важной численной оценкой шума является его мощность, которая не зависит от конкретной наблюдаемой реализации шума. Мощность шума вычисляется как среднее за достаточно длительный период наблюдения от квадрата шума. Именно по такой формуле вычисляется средняя мощность любого, в том числе шумового напряжения на сопротивлении величиной 1 Ом:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt. \quad (1)$$

Мощность шума, если он представляет собой электрическую величину, можно измерить ваттметром (рис. 2).

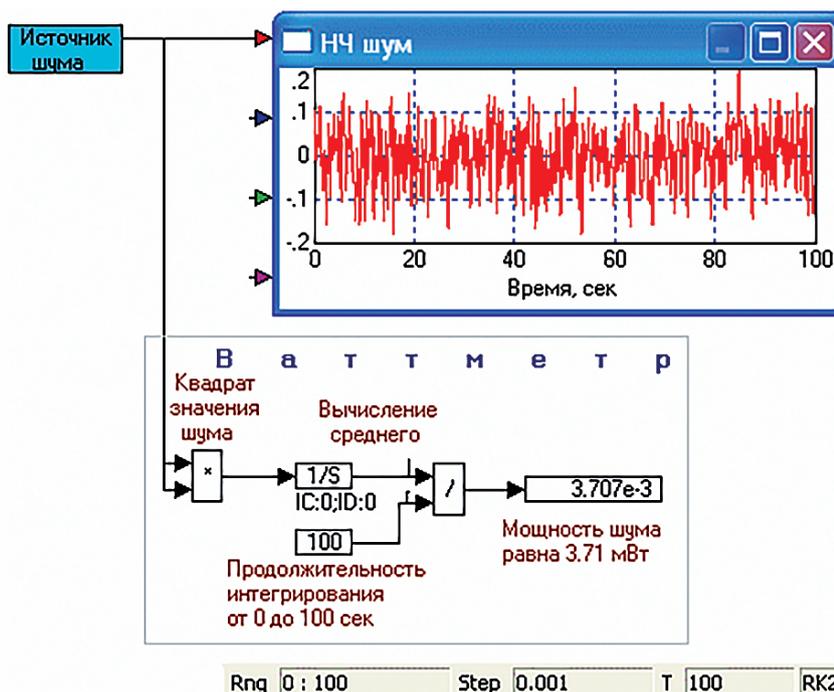


Рис. 2. Измерение мощности шума моделью ваттметра

Мощность шумов следует понимать в обобщенном смысле. Если управляемой величиной являются электрические напряжение или ток, то это традиционная мощность. Однако, если, например, управляемой величиной является температура, то термин «мощность» может употребляться здесь только в том смысле, что ее значение вычисляется как среднее за некоторый период времени от квадрата значений шумов температуры.

Взаимосвязь отстоящих по времени значений шума можно описать так называемой *автокорреляционной функцией*  $B(\tau)$ :

$$B(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T \eta(t) \eta(t - \tau) dt, \quad (2)$$

где  $\eta(t)$  — реализация случайного процесса;

$\eta(t - \tau)$  — смещенная по времени на величину  $\tau$  копия реализации случайного процесса;

$T$  — достаточно протяженный временной интервал, на котором проявляются все основные особенности шума.

Смысл корреляционной функции состоит в том, что среднее значение определяется за достаточно большой интервал времени от произведения сигнала и его копии, смещенных по времени на некоторую величину. Когда смещение равно нулю, то корреляционная функция равна средней мощности шума. Пока смещение сравнительно мало, корреляционная шума функция убывает с его ростом, а при больших значениях смещения, когда теряется корреляция между значениями шума и его смещенной копии, корреляционная функция близка к нулю. Покажем на рис. 3 получение корреляционной функции на примере детерминированного сигнала, для которого она может быть вычислена так же, как для случайного [5], [7]–[9].

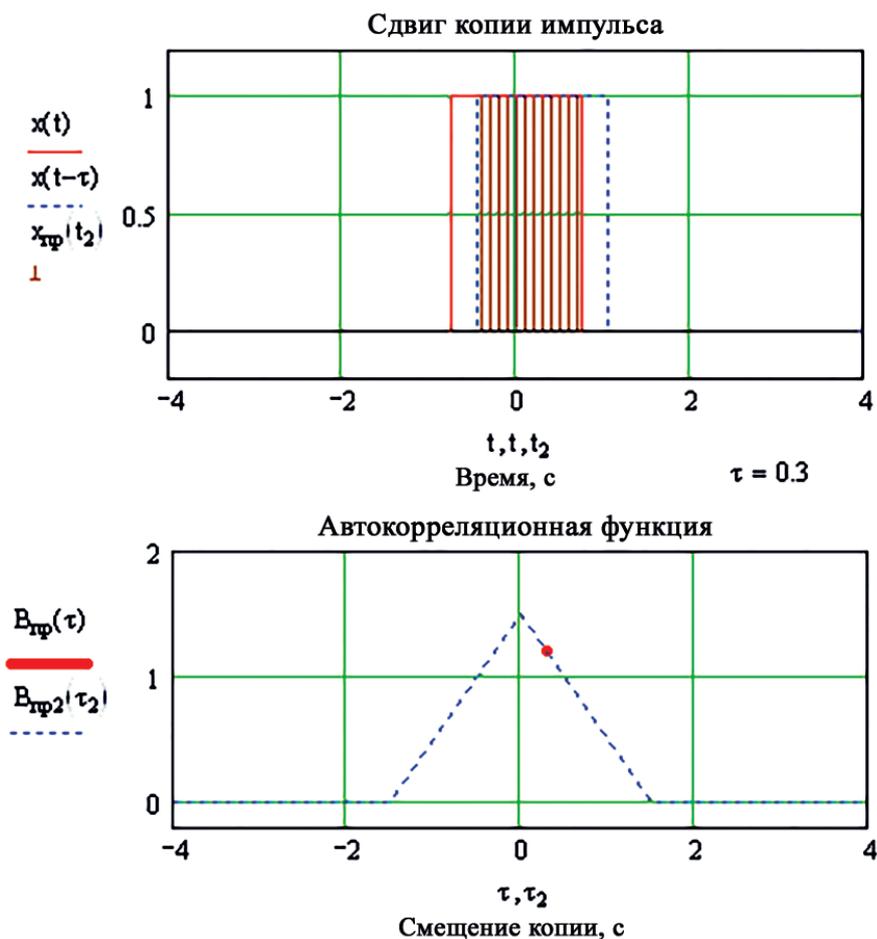


Рис. 3. Вычисление корреляционной функции прямоугольного импульса с амплитудой, равной единице, и длительностью 1,5 с

Значение корреляционной функции равно площади перекрытия импульсов, так как их амплитуды равны единице, следовательно, оно растет и убывает по линейному закону при изменении величины смещения. Значение корреляционной функции в нуле равно энергии сигнала, поскольку оно равно интегралу от квадрата амплитуды импульса, а деленное на длительность импульса дает его мощность [9], [10]. Автокорреляционная функция выходного сигнала источника шума 2, осциллограмма которого приведена на рис. 1, имеет вид рис. 4.

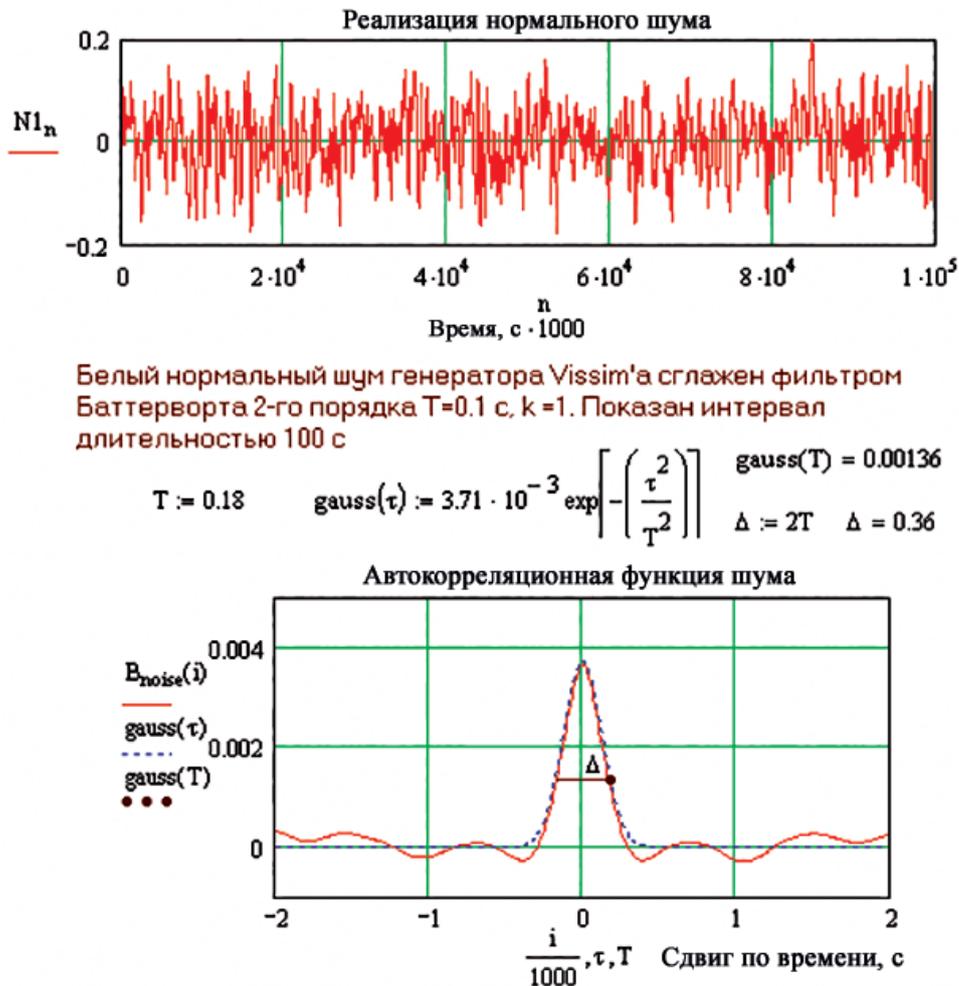


Рис. 4. Автокорреляционные функции:  
 а — реальной выборки шума (красная линия);  
 б — идеального нормального гауссова шума (синий пунктир)

Значение корреляционной функции в нуле равно мощности шума. Ширина корреляционной функции — это условная величина, которая может быть определена, например, на уровне, когда значение корреляционной функции уменьшается по сравнению с максимальным в  $e$  раз (или в 2 раза). Для вычисления автокорреляционной функции шума, приведенного на рис. 4, было использовано 100 000 его отсчетов, взятых на интервале, равном 100 с. Как видно из данного рисунка, при этом значения корреляционной функции за пределами пика не равны нулю, а имеют некоторые, значительно меньшие, чем максимум, ненулевые значения.

Корреляционная функция идеального гауссова шума условно вычисляется на бесконечном интервале интегрирования. Автокорреляционная функция шума характеризует интервал, на котором шум еще «помнит» о своем предыдущем поведении. Ширина  $\Delta$  функции определяет интервал этой «памяти». Преобразование Фурье автокорреляционной функции дает его энергетический спектр, т. е. спектральную плотность шума [11]–[13].

$$\text{gauss}(\tau) \text{ fourier, } \tau \rightarrow 1.1836446816347036030 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-8.100000000000000000 \cdot 10^{-3} \cdot \omega^2)$$

$$S(\omega) := 1.18364468 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-8.10 \cdot 10^{-3} \cdot \omega^2) \quad \omega_0 := \frac{1.7}{T} \quad \omega_0 = 9.44444$$

$$S(0) = 0.00118 \quad S(\omega_0) = 0.00057$$

$$P := \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{50} S(\omega) \, d\omega$$

$$P = 0.00371$$

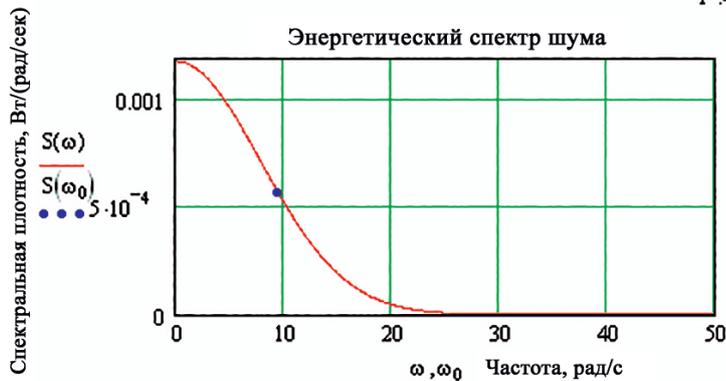


Рис. 5. Энергетический спектр (спектральная плотность) низкочастотного шума

Ширина спектра НЧ шумов разного вида обратно пропорциональна ширине автокорреляционной функции с коэффициентом порядка единицы (рис. 5). Его ширина обратно пропорциональна ширине автокорреляционной функции шума, а интеграл от спектральной плотности равен мощности шума. Ширина спектра обычно определяется на уровне, равном половине максимального значения спектра. Мощность шума может быть найдена интегрированием спектральной плотности по частоте (*равенство Парсеваля*).

Выполним сравнение значения интеграла  $P = 0,00371$  с результатом измерения, выполненного ваттметром, приведенного на рис. 2. Белый шум — удобная математическая модель для описания шумовых воздействий на САР, в том числе шумов в задании и возмущении, спектральная плотность которого постоянна на всех частотах, т. е. модель шума описывается всего одним параметром — спектральной плотностью  $N_0$ .

На практике всегда можно взять достаточно широкополосный шум, спектр которого значительно шире полосы пропускания системы, на которую подается шум. При этом реальный шум можно считать белым (рис. 6). В данном случае спектральная плотность на всех частотах одинакова.

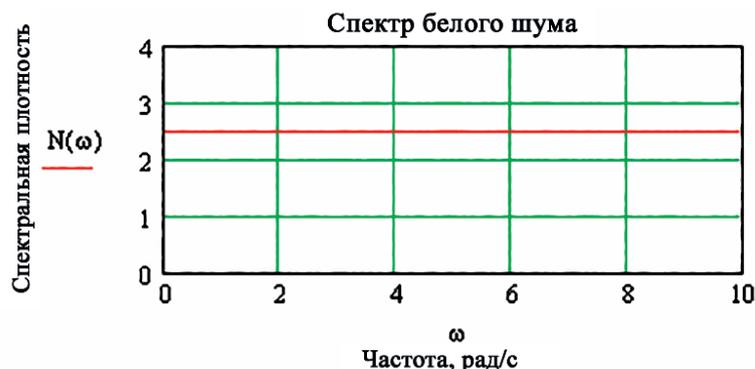


Рис. 6. Энергетический спектр (спектральная плотность) белого шума

Это значение показывает, какая мощность содержится в полосе частот, равной 1 рад/с [Вт/(рад/с)]. Временную модель белого шума можно представить себе в виде «тесной» последовательности дельта-функций, имеющих разные площади и знаки. Корреляционная функция белого шума представляет собой дельта-функцию, умноженную на величину спектральной плотности:

$$N(\omega) := N; N(\omega) \text{ invfourier}, \omega \rightarrow N \cdot \text{Dirac}(t). \quad (3)$$

Таким образом, корреляционная функция показывает, насколько быстро изменяются значения шума с течением времени. Мощность шума характеризует максимальное значение его автокорреляционной функции. Спектральная плотность шума характеризует его быстроту изменения с течением времени и мощность.

*Ошибки слежения.* Весьма значимым для понимания механизма влияния шумов на функционирование системы автоматического регулирования (САР) является случай аддитивных помех в сигнале задания. Причины таких помех многочисленны, в частности ими могут быть шумы каналов связи, по которым задание передается к САР. Рассмотрим две одинаковые САР, имеющие разные коэффициенты усиления контура (рис. 7). Нижняя САР (синяя переходная функция) имеет в пять раз меньшее быстродействие, чем верхняя.

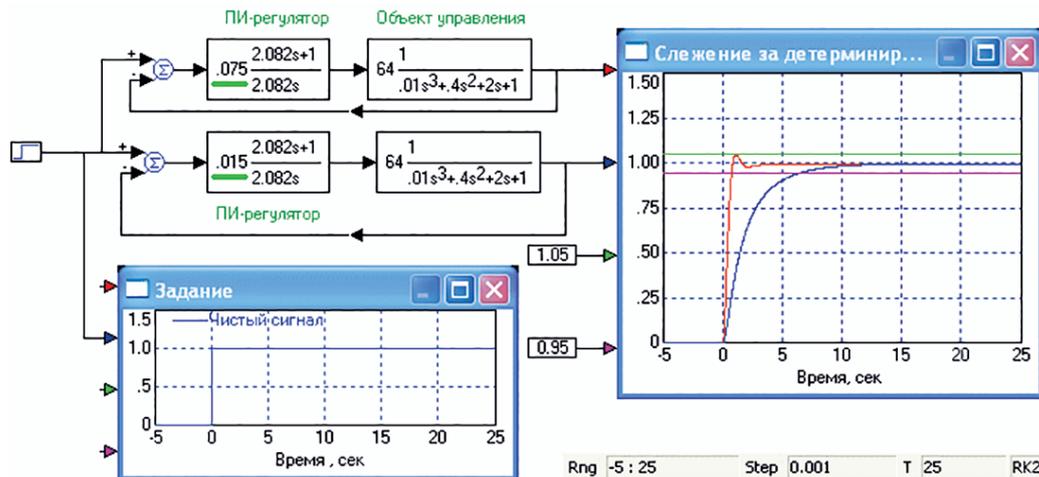


Рис. 7. Реакция САР на детерминированный, ступенчатый сигнал

В отсутствие шумов в задании качество верхней САР лучше, поскольку ее быстродействие выше в пять раз. Однако при наличии шумов картина поведения САР в установившемся режиме меняется (рис. 8).

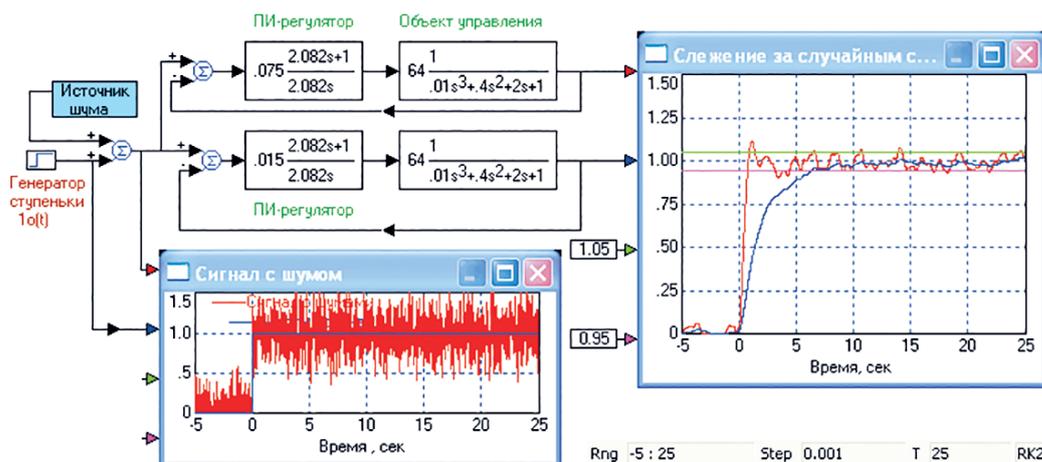


Рис. 8. Реакция САР на детерминированный ступенчатый сигнал, отягощенный шумами

Видно, что шумы на входе очень велики, их выбросы имеют тот же порядок, что и величина отслеживаемого сигнала. Шумы существенно сглаживаются системами автоматического регулирования, которые в данном случае можно рассматривать как фильтры нижних частот, причем

ошибки в установившемся режиме нижней, более инерционной САР, меньше. Увеличение времени наблюдения показывает, что иногда появляются особенно большие выбросы ошибок. Более инерционная САР в данном случае является более предпочтительной в отношении точности слежения, но это достигается ценой уменьшения в пять раз быстродействия.

Шумы приводят к случайным блужданиям управляемой величины, причем у более быстродействующей, более широкополосной верхней САР, эти блуждания имеют больший диапазон, чем у нижней, более медленной, инерционной. Быстрая САР успевает отслеживать и относительно быстрые компоненты шума, а медленная, более инерционная САР — не успевает, сглаживает их. Эти случайные блуждания управляемой величины и есть абсолютные значения ошибок слежения. Отметим, что шумы в задании зачастую на практике могут быть отфильтрованы еще до подачи задания на САР, причем технология может позволить использовать для этого значительно более узкополосный, по сравнению с САР, фильтр. Это также является одной из причин, объясняющей, почему задача стабилизации, т. е. компенсации влияния шумов в возмущении на управляемую величину, является более значимой на практике, чем задача слежения за заданием на фоне аддитивного шума [5], [9], [14].

*Ошибки стабилизации.* В практике управления технологическими объектами более значимой является задача стабилизации, при которой САР компенсирует влияние возмущения и его случайных изменений на управляемую величину. Зачастую возмущение является случайной величиной, поскольку оно определяется рядом непредсказуемых и случайных факторов. На рис. 9 показана связь быстродействия САР и ее способность компенсировать влияние возмущений шумового характера на управляемую стабилизируемую величину (верхняя САР осуществляет стабилизацию с меньшими ошибками (синяя линия), чем более инерционная нижняя САР (красная линия), хотя выигрыш в точности и невелик).

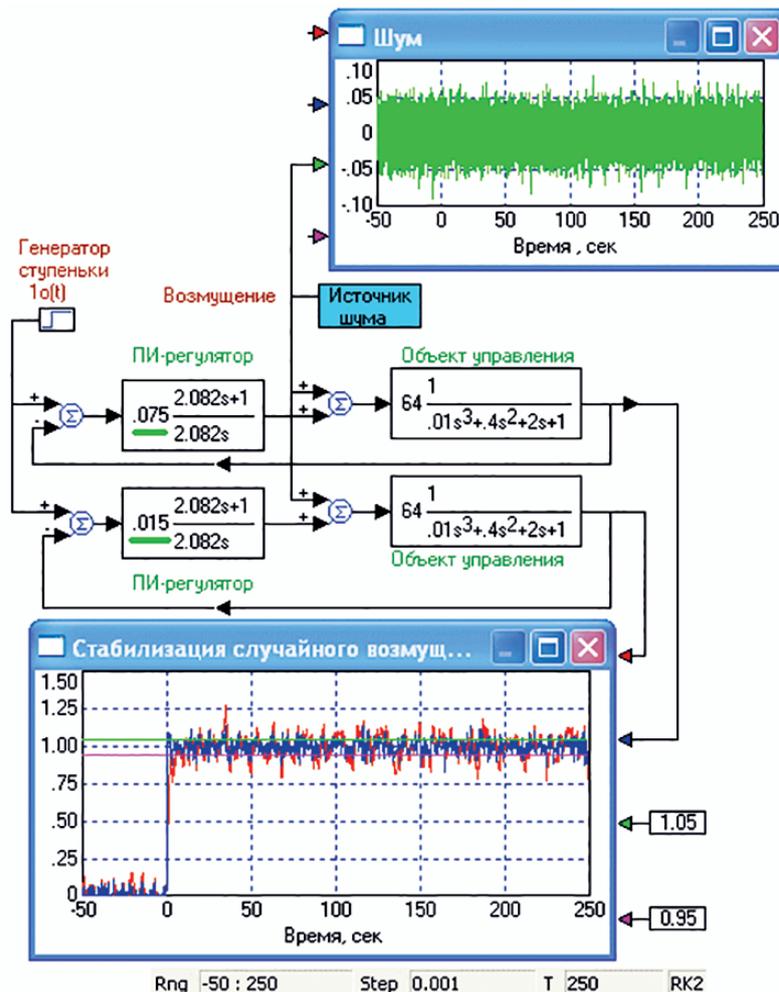


Рис. 9. Верхняя САР, имеющая большее быстродействие

Как видно, в отношении стабилизации ситуация обратная. Быстрая САР успевает погасить, компенсировать большую часть шумов, в отличие от медленной инерционной САР, поэтому ее ошибки стабилизации больше по величине, чем быстрой САР. Таким образом, для повышения качества слежения за сигналом задания, отягощенном аддитивными шумами, следует сужать полосу пропускания САР с управлением по отклонению, уменьшать ее быстродействие, в то время как для повышения качества САР в режиме стабилизации в условиях наличия шумовой составляющей в возмущении следует увеличивать ее быстродействие. Следовательно, при проектировании САР, если задание и возмущение сопровождаются шумами, приходится находить разумный компромисс при выборе оптимального быстродействия.

Переход к комбинированной САР с управлением по отклонению и возмущению существенно улучшает качество стабилизации [15] (рис. 10). Комбинированная САР компенсирует случайные изменения возмущения значительно лучше.

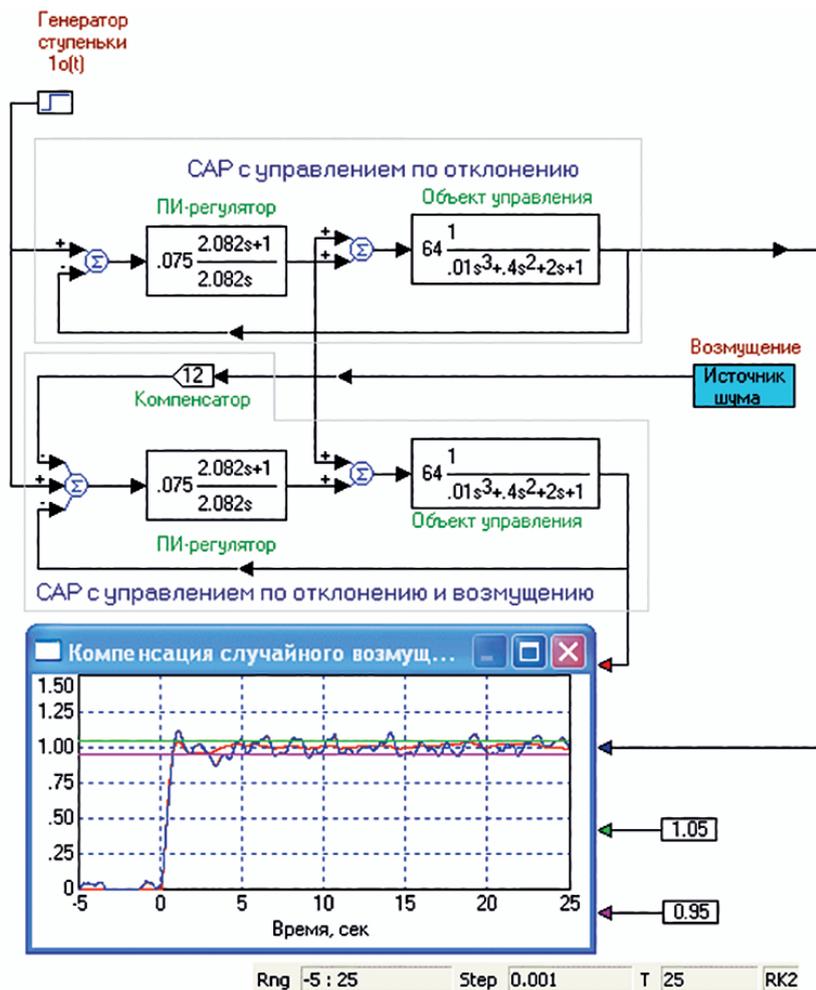


Рис. 10. САР с управлением по отклонению и САР с комбинированным управлением по отклонению и возмущению в режиме слежения и стабилизации

### Заключение (Conclusion)

Целью математического описания реакции САР на случайные воздействия является оценка точности слежения и стабилизации, а также выработка мер по минимизации ошибок регулирования, обусловленных шумами. В первом приближении инженера интересуют всего несколько величин, достаточно просто и в то же время подробно характеризующих влияние шумов на САР. Это прежде всего мощность шумов на выходе САР. Квадратный корень из мощности шумов дает один из главных показателей качества САР — среднеквадратическую ошибку регулирования, которая

характеризует диапазон, в котором будет находиться реальная ошибка в процессе регулирования с известной вероятностью.

Мощность шумов следует понимать в обобщенном смысле. Если управляемой величиной являются электрические напряжение или ток, то это традиционная мощность. Но, если, например, управляемой величиной является температура, то термин «мощность» может употребляться здесь только в том смысле, что ее значение вычисляется как среднее за некоторый период времени от квадрата значений шумов температуры. Кроме того, разработчика и технолога может интересовать скорость изменения ошибок регулирования. Например, для сравнительно широкополосных шумов в управляемой величине каждую секунду в течение времени, равном 0,001 с, ошибка превышает допустимые пределы, а остальное время она находится в этих пределах. Для медленных шумов ошибка может даже заметно не измениться за одну секунду. Поэтому в данном случае следует сделать вывод о том, например, что в течение одной секунды из тысячи ошибок выходит за допустимые пределы, а остальное время остается допустимой. Скорость изменения во времени ошибки регулирования может характеризоваться либо шириной автокорреляционной функции выходных шумов, т. е. случайных блужданий управляемой величины, либо шириной их спектра.

При моделировании шумовых воздействий полезной является модель шума в виде нормального белого шума, имеющая постоянную спектральную плотность, значения которой можно получить на практике по спектру случайной составляющей ошибки регулирования и комплексным коэффициентам передачи САР по каналам управления и возмущения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Понтрягин Л. С.* Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин [и др.]. — М.: Наука, 1970. — 392 с.
2. *Петров К. Э.* Компараторная структурно-параметрическая идентификация моделей скалярного многофакторного оценивания / К. Э. Петров, В. В. Крючковский. — Херсон: Олди-плюс, 2009. — 294 с.
3. *Павловский Ю. Н.* Теория факторизации и декомпозиции управляемых динамических систем и ее приложения / Ю. Н. Павловский // Известия Академии наук СССР. Техническая кибернетика. — 1984. — № 2. — С. 45–57.
4. *Павлов В. В.* Начала теории эргатических систем / В. В. Павлов. — Киев: Наукова думка, 1975. — 240 с.
5. *Овезгельдыев А. О.* Синтез и идентификация моделей многокритериального оценивания и оптимизации / А. О. Овезгельдыев, Э. Г. Петров, К. Э. Петров. — К.: Наукова думка, 2002. — 163 с.
6. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения / Под ред. Р. Р. Ягера. — М.: Радио и связь, 1986. — 409 с.
7. *Пивкин В. Я.* Нечеткие множества в системах управления / В. Я. Пивкин, Е. П. Бакулин, Д. И. Кореньков; под ред. Ю. Н. Золотухина. — М.: Fuzzy Technologies Lab, 1999. — 176 с.
8. *Никифоров В. О.* Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений / В. О. Никифоров. — СПб.: Наука, 2003. — 282 с.
9. *Нариньяни А. С.* Недоопределенность в системе представления и обработки знаний / А. С. Нариньяни // Техническая кибернетика. — 1986. — № 5. — С. 3–28.
10. *Месарович М.* Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такаха. — М.: Мир, 1973. — 332 с.
11. *Лоскутов А. Ю.* Основы теории сложных систем / А. Ю. Лоскутов, А. С. Михайлов. — М.: НИЦ «Регулярная и стохастическая динамика», 2007. — 620 с.
12. *Аронсон Э.* Теория диссонанса: прогресс и проблемы / Э. Аронсон // Современная зарубежная социальная психология. — М.: Изд-во МГУ, 1984. — С. 111–126.
13. *Osadchiy A.* Signal Processing Algorithm Based on Discrete Wavelet Transform / A. Osadchiy, A. Kamenev, V. Saharov, S. Chernyi // Designs. — 2021. — Vol. 5. — Is. 3. — Pp. 41. DOI: 10.3390/designs5030041.
14. *Kramar V.* Analysis Technology and Cathodic Protection for Hull Structures of Ships and Floating Facilities / V. Kramar, A. Rodkina, O. Ivanova, S. Chernyi, A. Zinchenko // Inventions. — 2021. — Vol. 6. — Is. 4. — Pp. 74. DOI: 10.3390/inventions6040074.
15. *Zhilentkov A.* Application of Artificial Intelligence Technologies to Assess the Quality of Structures / A. Zhilentkov, S. Chernyi, V. Emelianov // Energies. — 2021. — Vol. 14. — Is. 23. — Pp. 8040. DOI: 10.3390/en14238040.

REFERENCES

1. Pontryagin, L. S., et al. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov*. M.: Nauka, 1970.
2. Petrov, K.E., and V. V. Kryuchkovskii. *Komparatornaya strukturno-parametricheskaya identifikatsiya modelei ska-lyarnogo mnogofaktornogo otsenivaniya*. Kherson: Oldi-plyus, 2009.
3. Pavlovskii, Yu. N. "Teoriya faktorizatsii i dekompozitsii upravlyaemykh dinamicheskikh sistem i ee prilozheniya." *Engineering Cybernetics* 2 (1984): 45–57.
4. Pavlov, V. V. *Nachala teorii ergaticheskikh sistem*. Kiev: Naukova dumka, 1975.
5. Ovezgel'dyev, A.O., E. G. Petrov, and K. E. Petrov. *Sintez i identifikatsiya modelei mnogokriterial'nogo otsenivaniya i optimizatsii*. K.: Naukova dumka, 2002.
6. Yager, R. R., ed. *Nechetkie mnozhestva i teoriya vozmozhnostei. Poslednie dostizheniya*. M.: Radio i svyaz', 1986.
7. Pivkin, V. Ya., E. P. Bakulin, and D. I. Koren'kov. *Nechetkie mnozhestva v sistemakh upravleniya*. Edited by Yu. N. Zolotukhin. M.: Fuzzy Technologies Lab, 1999.
8. Nikiforov, V. O. *Adaptivnoe i robustnoe upravlenie s kompensatsiei vozmushchenii*. SPb.: Nauka, 2003.
9. Narin'yani, A. S. "Nedopredelennost' v sisteme predstavleniya i obrabotki znanii." *Tekhnicheskaya kibernetika* 5 (1986): 3–28.
10. Mesarovic, M., D. Macko, and Y. Takahara. *Theory of hierarchical multilevel systems*. Academic Press New York and London, 1970.
11. Loskutov, A. Yu., and A. S. Mikhailov. *Osnovy teorii slozhnykh sistem*. M.: NITs «Regulyarnaya i stokhasticheskaya dinamika», 2007.
12. Aronson, E. "Dissonance theory: Progress and problems." *Theories of cognitive consistency: A sourcebook*. Edited by R. P. Abelson, E. Aronson, W. J. McGuire, T. M. Newcomb, M. J. Rosenberg, and P. H. Tannenbaum. Chicago, IL: Rand McNally, 1968. 5–27.
13. Osadchiy, Andrey, Aleksandr Kamenev, Vladimir Saharov, and Sergei Chernyi. "Signal Processing Algorithm Based on Discrete Wavelet Transform." *Designs* 5.3 (2021): 41. DOI: 10.3390/designs5030041.
14. Kramar, Vadim, Anna Rodkina, Olga Ivanova, Sergei Chernyi, and Anton Zinchenko. "Analysis Technology and Cathodic Protection for Hull Structures of Ships and Floating Facilities." *Inventions* 6.4 (2021): 74. DOI: 10.3390/inventions6040074.
15. Zhilenkov, Anton, Sergei Chernyi, and Vitalii Emelianov. "Application of Artificial Intelligence Technologies to Assess the Quality of Structures." *Energies* 14.23 (2021): 8040. DOI: 10.3390/en14238040.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Доровской Владимир Алексеевич** — доктор технических наук, профессор Керченский государственный морской технологический университет 298309, Российская Федерация, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82  
 e-mail: [esiap@mail.ru](mailto:esiap@mail.ru)

**Зинченко Елена Геннадьевна** — инженер Керченский государственный морской технологический университет 298309, Российская Федерация, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82  
 e-mail: [eltel85@bk.ru](mailto:eltel85@bk.ru)

**Чернобай Кирилл Сергеевич** — аспирант *Научный руководитель:* Доровской Владимир Алексеевич Керченский государственный морской технологический университет 298309, Российская Федерация, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82  
 e-mail: [aspirantchernobai@gmail.com](mailto:aspirantchernobai@gmail.com)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Dorovskoy, Vladimir A.** — Dr. of Technical Sciences, professor Kerch State Maritime Technological University 82 Ordzonikidze Str., Kerch, 298309, Russian Federation  
 e-mail: [esiap@mail.ru](mailto:esiap@mail.ru)

**Zinchenko, Elena G.** — Engineer Kerch State Maritime Technological University 82 Ordzonikidze Str., Kerch, 298309, Russian Federation  
 e-mail: [eltel85@bk.ru](mailto:eltel85@bk.ru)

**Chernobai, Kirill S.** — Postgraduate Supervisor: Dorovskoy, Vladimir A. Kerch State Maritime Technological University 82 Ordzonikidze Str., Kerch, 298309, Russian Federation  
 e-mail: [aspirantchernobai@gmail.com](mailto:aspirantchernobai@gmail.com)