

# ФЁДОРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ 2020

МЕЖДУНАРОДНАЯ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ  
С ЭЛЕМЕНТАМИ  
НАУЧНОЙ ШКОЛЫ



Москва  
17 – 20 ноября 2020 г.



Министерство образования и науки Российской Федерации  
Национальный исследовательский университет «МЭИ»

# ФЁДОРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ 2020

МЕЖДУНАРОДНАЯ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ  
С ЭЛЕМЕНТАМИ  
НАУЧНОЙ ШКОЛЫ

Москва  
17 – 20 ноября  
2020 г.

**Фёдоровские чтения — 2020: L Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы (Москва, 17—20 ноября 2020 г.) / под общ. ред. Ю.В. Матюниной. — М.: Издательский дом МЭИ, 2020. — 435 с.**

ISBN 978-5-383-01439-4

Публикуются материалы Международной научно-практической конференции с элементами научной школы для молодежи «Фёдоровские чтения — 2020», прошедшей в Национальном исследовательском университете «МЭИ» 17—20 ноября 2020 г.

Научная тематика конференции — «Энергосбережение и энергоэффективность технологий передачи, распределения и потребления электрической энергии». Публикации характеризуются охватом широкого круга проблем в областях электроснабжения и энергоэффективности, энергосбережения и энергосберегающих методов, рационализации систем электроснабжения предприятий и организаций, использования собственных источников энергии в системах электроснабжения, нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Сборник предназначен для участников конференции и может быть полезен широкому кругу специалистов, занятых проектированием и эксплуатацией электрического хозяйства, преподавателям, научным сотрудникам, аспирантам и студентам.

---

*Научное издание*

**ФЁДОРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ — 2020**  
**L Международная научно-практическая конференция**  
**с элементами научной школы**

Корректор Г.Ф. Раджабова  
Компьютерная верстка М.Н. Маркиной

---

Подписано в печать с оригинал-макета 16.11.20  
Бумага офсетная                      Печать офсетная  
Усл. печ. л. 27,2                      Уч.-изд. л. 24,3

Формат 60×90/16

---

АО «Издательский дом МЭИ», 111024, Москва, ул. 2-я Кабельная, д. 2  
Отпечатано в АО «Т8 Издательские Технологии», Москва, Волгоградский пр-т, д. 45, корп. 5

**ISBN 978-5-383-01439-4**

© Авторы, 2020  
© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2020

## **МЕТОДОЛОГИЯ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ АНАЛИЗЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

Работа магистральных газопроводов (МГ) основана на оптимальных режимах при максимальном использовании их пропускной способности при минимальных энергозатратах [1—4], которые характеризуется неравномерностью подачи газа на компрессорных станциях (КС) в течение года (месяца, суток), несмотря на использование научных методик оптимизации [5—7].

Для уменьшения затрат мощности КС на перекачку газа, увеличения пропускной способности газопровода и экономии энергоресурсов необходимо поддерживать максимальное расчетное давление газа в трубопроводе и снижать температуру перекачиваемого газа [8—10]. При этом электроприводные газоперекачивающие агрегаты (ЭГПА) должны быть частотно-регулируемыми и инвариантными к возмущениям с отрицательной обратной связью по частоте вращения (давлению газа) [11—14].

**Традиционные методы формализации процессов в ЧРП.** Наиболее удобным методом анализа статических и квазистатических САУ частотно-регулируемого электропривода (ЧРП) с точки зрения электромагнитных и электромеханических процессов является аппарат преобразования Фурье и частотных характеристик [1, 15]. Преобразование Фурье сигнала  $f(t)$  можно трактовать как его разложение по базису комплексных экспонент  $e^{-j\Omega t}$  для всех частот  $\Omega$  на интервале  $(-\infty, +\infty)$ :

$$F(\Omega) = \int f(t) e^{-j\Omega t} dt . \quad (1)$$

Комплексная функция  $F(\Omega)$  характеризует частотный спектр сигнала во всем диапазоне времени. Для нестационарного сигнала частотный спектр, полученный в разных отрезках времени, может существенно отличаться. Изображение функции Фурье  $F(\Omega)$  по (1) не имеет временной координаты и не содержит информации, когда в нестационарном сигнале появились и исчезли составляющие разных частот. Одним из решений этой проблемы является переход к оконному преобразованию Фурье:

$$F(\Omega, \tau) = \int f(t) W(1 - \tau) e^{-j\Omega t} dt , \quad (2)$$

где  $W(1 - \tau)$  — функция-окно.

Преобразование Фурье находится от произведения сигнала  $f(t)$  на окно, которое занимает разные положения во времени в соответствии со значением параметра  $\tau$ . Результат преобразования  $F(\Omega, \tau)$  по (2) имеет как частотную, так и временную координату, позволяя отслеживать изменение частотного спектра во времени. Однако из-за фиксированной ширины окна эта информация может быть существенно искажена. Слишком узкое окно позволяет получить высокое разрешение по времени, но теряет важные особенности частотного спектра. Иначе оно не локализует информацию о спектре во времени.

**Основы вейвлет-преобразования для САУ электроприводами.** Более информативный подход к анализу нестационарного сигнала обеспечивает вейвлет-преобразование (ВП) (*wavelet*). При этом сигнал  $f(t)$  раскладывается по базису функций, называемых вейвлетами:

$$\Psi(t) = \Psi[(t - \tau) / \alpha]. \quad (3)$$

Непрерывное вейвлет-преобразование сигнала  $f(t)$  выполняется по

$$W(\alpha, \tau) = \frac{1}{\sqrt{|\infty|}} \int f(t) \Psi(t - \tau) / \alpha \, dt. \quad (4)$$

В результате ВП (4) получается двухмерная функция — вейвлет-образ  $f(t)$ . Параметр масштаба  $\alpha$  пропорционален периоду колебаний вейвлета, а параметр  $\tau$  — его временной сдвиг. Значение  $W(\alpha, \tau)$  получается тем больше, чем заметнее сигнал  $f(t)$  коррелирует с вейвлетом при  $\alpha$  и  $\tau$ . При этом в сигнале сильнее выражена составляющая частоты, соответствующая  $\alpha$  в момент  $\tau$ .

Базисные функции вейвлетов, если они определены на пространстве  $L^2(R)$  (пространство комплекснозначных функций  $f(t)$  на прямой с ограниченной энергией), колеблются вокруг оси абсцисс и быстро сходятся к 0 по мере увеличения абсолютного значения аргумента.

В задачах анализа ЧРП для данного сигнала  $f(t)$  исследуется его вейвлет-образ (ВО), а в задачах синтеза ВО формируется регулятором из ВО сигнал ошибки, чтобы получить желаемый сигнал  $f(t)$ . В САУ временной закон управления получается на основе некоторого правила ВП сигнала. Интерес имеет непосредственная обработка спектров сигналов при цифровой реализации регуляторов.

Известно, что сигнал датчика скорости содержит полезный сигнал и совокупность помех. Если изменять полосу пропускания регулятора скорости на время переходного процесса приема-сброса нагрузки или возникновения колебаний, то получается доказанный на практике эффект.

Идея перестраиваемого регулятора нашла практическое воплощение в турбокомпрессорных и вентиляторных установках ЭГПА МГ с ПИ-регулятором скорости. При этом коэффициент П-части регулятора устанавливается в зависимости от системных отклонений, а коэффициент его И-части зависит от скорости, улучшая динамику и сглаживая все стохастические выбросы.

**Дискретное ВП и кратномасштабный анализ.** Очевидно, что идея использования ВП для обработки дискретных данных является весьма привлекательной (дискретизация данных необходима при их обработке на ПК). Профессору И. Добеши удалось найти метод, позволяющий построить серию ортогональных вейвлетов, каждый из которых определяется конечным числом коэффициентов, и алгоритм, реализующий быстрое ВП на дискретных данных (алгоритм Малла).

Дискретизация параметров  $\alpha$  и  $\tau$  в (4) происходит не равномерно, а на логарифмической сетке через степени 2. Связь непрерывных и дискретных вейвлетов (3) выражается значениями  $\alpha = 2^j$ ;  $\tau = K \cdot 2^j$ , где  $j$  и  $K$  — целые числа, а  $\tau$  — дискретное время. Разложение дискретного сигнала  $f(t)$  по дискретному базису  $\Psi_{jK}(t)$  является дискретным ВП, а ВО этого сигнала есть двумерная матрица коэффициентов. Первым ортогональным дискретным вейвлетом является вейвлет Хаара. Вейвлет-функция имеет вид меандра, но его базисная функция плохо локализована по частоте.

Поскольку для полной реконструкции сигнала могут быть применены только ортогональные вейвлеты с компактным носителем, то преимуществом вейвлетов семейства Добеши является то, что их использование не вносит дополнительной избыточности в исходные данные и сигнал может быть восстановлен зеркальными фильтрами.



Рис. 1. Ортогональные фильтры Добеши, масштабирующая функция  $\psi$  и вейвлет  $\phi$

Вейвлет-анализ (декомпозиция) сигнала решается поэтапно, со своим значением масштаба. Пусть анализ проводится для  $M$  отсчетов сигнала  $f(t)$ :  $f_0, f_1, \dots, f_{M-1}$ . На первом этапе декомпозиции параметр масштаба  $j = 1$ , и сигнал делится на две составляющие: аппроксимирующую и уточняющую. При этом число коэффициентов в 2 раза меньше, чем в исходном  $M$ , поскольку сигнал пропущен через НЧ-фильтр с полосой 0,5. На втором этапе

выполняется разложение при масштабе всех базисных функций  $j = 2$ . Декомпозиция длится до тех пор, пока аппроксимирующая составляющая не вырождается в одно постоянное значение среднего исходного сигнала  $f(t)$ . Начав с этого значения, можно восстановить исходный сигнал  $f(t)$ , используя коэффициенты ВО. При необходимости коррекции сигнала все коэффициенты подвергаются коррекции ВП.

**Выводы.** Подход к формированию вейвлет-образа позволяет синтезировать алгоритм вейвлет-регулятора с декомпозицией входного сигнала, получения текущего вейвлет-образа, изменения его коэффициентов и реконструкции выходного сигнала по измененному вейвлет-образу. Изменение коэффициентов вейвлет-образа соответствует алгоритму электропривода, а преобразователь напряжения воспроизводит функцию типа Хаара.

### Литература

1. **Оптимальное** управление электромеханическими комплексами в условиях стохастических возмущений / О.В. Крюков, А.П. Сарычев, А.В. Серебряков и др. М.: АО «Корпорация ВНИИЭМ», 2017.
2. **Крюков О.В., Серебряков А.В., Степанов С.Е.** Решение задач энергоэффективности объектов транспорта газа ОАО «Газпром» с применением частотно-регулируемых электроприводов // Фёдоровские чтения – 2015 : XLV Междун. науч.-практ. конф. с элементами науч. школы (Москва, 11—13 ноября 2015 г.). М.: Издательский дом МЭИ, 2015. С. 101—105.
3. **Крюков О.В.** Особенности энергоснабжения подводных добычных комплексов морских месторождений углеводородов // Фёдоровские чтения – 2019 : XLIX Междун. науч.-практ. конф. с элементами науч. школы (Москва, 20—22 ноября 2019 г.). М.: Издательский дом МЭИ, 2019. С. 357—359.
4. **Khlynin A.S., Kryukov O.V., Stepanov S.E.** Energy optimization of gas compressor units electric drives // XVI Междун. конф. «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» (МКЭЭЭ-2016) Алушта, 19—24 сентября 2016 г.: труды. М.: Фирма «Знак», 2016. С. 137—139.
5. **Саушев А.В., Бова Е.В., Белоусов И.В.** Проектирование электротехнических устройств: учеб. пособие. СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2015. 168 с.
6. **Васенин А.Б., Крюков О.В.** Проектирование электромеханической части и систем управления энергетических установок газотранспортных потребителей // Известия ТГУ. Технические науки. 2011. № 5–1. С. 47—51.
7. **Воронков В.И., Крюков О.В., Рубцова И.Е.** Основные экологические направления и задачи энергосбережения при проектировании объектов ОАО «Газпром» // Газовая промышленность. 2013. № 7 (693). С. 74—78.
8. **Крюков О.В., Степанов С.Е., Бычков Е.В.** Опыт применения частотно-регулируемого привода вентиляторов АВО газа // Труды IX Междун. (XX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу (АЭП-2016), Пермь, 3—7 октября 2016 г. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2016. С. 428—432.