

# Цифровая нелинейная система управления электроприводом

Юрий Геложе, Евгений Коломейцев,  
Владимир Чуйков (Ростовская обл.)

Представлены результаты моделирования процессов в цифровой системе управления, учитывающего ограниченность ресурса управляющего воздействия электропривода. Показано, что реализация элементов ПИД-регулятора на основе простейших разностных схем и применение электроприводов с высокими номинальными угловыми скоростями выходного вала могут обеспечивать проигрыш в точности не более 8% по сравнению с линейной дискретной системой.

## ВВЕДЕНИЕ

Прогресс высокопроизводительной вычислительной техники и программного обеспечения позволяет решать задачи синтеза оптимальной (по Винеру) системы в режиме реального времени. Однако реализовать линейную электро-механическую систему практически невозможно, поскольку ресурс величины управляющего воздействия электропривода ограничен, схемы цифровых регуляторов имеют ограниченный порядок разностей и погрешности дискретизации. Поэтому актуальной задачей является исследование нелинейных цифровых систем с целью определения параметров исполнительных механизмов, обеспечивающих минимальный проигрыш в точности по сравнению с оптимальными системами.

## Постановка задачи

Показано [1, 2], что для слежения за случайным колебательным процессом, энергетический спектр которого имеет вид:

$$S_m(\omega) = \sigma_m^2 \frac{4d\Omega_0^3}{\left[(j\omega)^2 + 2d\Omega_0 j\omega + \Omega_0^2\right]^2},$$

где  $\sigma_m^2$  – дисперсия сигнала;  $d$  – коэффициент демпфирования фильтра – формирователя сигнала (ФФС);  $\Omega_0$  – частота свободных (недемпфированных) колебаний ФФС.

В условиях, когда цифровой координатор вырабатывает дискретный «белый» шум с дисперсией  $\sigma_n^2$  при времени дискретизации  $T_d = 1$  мс, в автоматической системе может быть использован ПИД-регулятор, при этом

проигрыш по величине дисперсии ошибки по отношению к винеровской (непрерывной) системе составляет 0,2...4% для отношений сигнал/шум  $k = \sigma_m^2/\sigma_n^2$  от  $10^2$  до  $10^8$ . Использование такого регулятора обеспечивает системе астатизм второго порядка.

Ставится задача моделирования процессов в цифровой автоматической системе с учётом ограничения на ресурс управляющего воздействия электропривода [2]. При этом дифференциатор и интегратор, реализованные в управляющей ЭВМ по простейшим разностным схемам [2], имеют следующие передаточные функции:

$$W_{\text{диф.}}^*(z) = \frac{1-z^{-1}}{T_d} = \frac{z-1}{T_d z};$$

$$W_{\text{инт.}}^*(z) = \frac{T_d z^{-1}}{z-1} = \frac{T_d}{z-1}.$$

Очевидно, что применение столь простых реализаций элементов цифрового регулятора нелинейного электропривода скажется на точности системы.

Таким образом, целью работы является определение точности нелинейной цифровой системы с астатизмом второго порядка при условии, что используется простейшая цифровая реализация регулятора.

Для моделирования процессов в системе применяется пакет программ Matlab. Структура математической модели цифровой системы управления представлена на рисунке 1. Моделирование осуществлено для  $\Omega_0 = 2\pi \times 0,35$  рад/с,  $d = 0,5$  и  $k$  в интервале от  $10^4$  до  $10^6$ .

Передаточная функция электропривода имеет вид:

$$W_{\text{ЭМ}}(s) = \frac{k_{\text{ЭМ}}}{s(T_{\text{ЭМ}}s + 1)},$$

где  $k_{\text{ЭМ}}$  – статический коэффициент передачи электропривода по скорости;  $T_{\text{ЭМ}}$  – электротехническая постоянная времени электропривода, равная 0,05 с.

Моделирование процессов произведено для величин  $k_{\text{ЭМ}}$  от 5 до 80 град/Вс.

Коэффициенты передачи  $k_1, k_2, k_3$  дифференцирующей, пропорциональной и интегрирующей ветвей ПИД-регулятора определяются следующими выражениями [1]:

$$k_1 = \frac{\sqrt{2}\Omega_{\text{опт}} T_{\text{ЭМ}}}{k_{\text{ЭМ}}},$$

$$k_2 = \frac{\Omega_{\text{опт}} (\Omega_{\text{опт}} T_{\text{ЭМ}} + \sqrt{2})}{k_{\text{ЭМ}}},$$

$$k_3 = \frac{\Omega_{\text{опт}}^2}{k_{\text{ЭМ}}},$$

где  $\Omega_{\text{опт}}$  – частота свободных колебаний оптимальной системы (численные значения этого параметра приведены в [1] для различных отношений сигнал/шум);  $k_{\text{ЭМ}}$  и  $T_{\text{ЭМ}}$  – упомянутые выше параметры электропривода.

Дискретная передаточная функция соединения экстраполятора нулевого порядка и электропривода имеют вид [2]:

$$W_{\text{Э-ЭП}}(z) = k_{\text{ЭМ}} \left[ \frac{T_d}{z-1} + T_{\text{ЭМ}} \left( \exp\left(-\frac{T_d}{T_{\text{ЭМ}}}\right) - 1 \right) \frac{1}{z - \exp\left(-\frac{T_d}{T_{\text{ЭМ}}}\right)} \right].$$

Чтобы материалами данной статьи могли воспользоваться разработчики цифровых управляющих устройств для электроприводов, в которых используются электромоторы с различ-

ными номинальными скоростями вращения валов, ресурс управляющего воздействия электропривода принят равным  $\pm 1$  В. Тогда значение  $k_{ЭМ}$  равно численному значению номинальной угловой скорости вращения выходного вала электропривода  $\Omega_H$ [град/с]. Этим же обусловлено включение в модель автоматической системы двухстороннего ограничителя с координатами угловых точек  $(+1, +1)$  и  $(-1, -1)$ .

Чтобы не учитывать ошибки переходного процесса, обработка результатов моделирования с целью определения среднеквадратической ошибки  $\sigma_e$  осуществлялась, начиная с 10 с, при полном интервале наблюдения системы, равном 100 с.

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ

Моделирование процессов в линейной дискретной автоматической системе (без учёта ограниченности ресурса управления электропривода) показало, что за счёт дискретизации процессов и применения простейших разностных схем цифровых дифференциаторов и интеграторов для отношений сигнал/шум  $10^4$ ,  $10^5$ ,  $10^6$  ошибка составляла 6,45, 2,13 и 0,75 угловой секунды соответственно. Теоретическая оценка установившейся ошибки на бесконечном интервале наблюдения в непрерывной (винеровской) системе составляла 2,54, 1,07 и 0,45 угловой секунды соответственно. Таким образом, проигрыш в точности из-за ограничения времени наблюдения до 100 с и применения простейшего цифрового управляющего устройства с частотой дискретизации 1 кГц ориентировочно равен 2.

Моделирование цифровой нелинейной системы показало, что временные диаграммы изменения ошибки слежения и управляющего воздействия для отношений сигнал/шум  $10^4$  и электроприводов с номинальной угловой скоростью  $\Omega_H$  5, 60 и 80 град/с имеют вид, приведённый на рисунках 2 и 3, 4 и 5, 6 и 7 соответственно. Из ри-

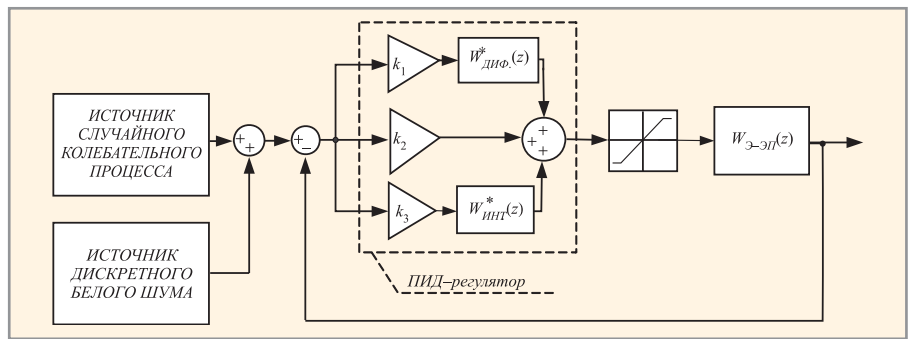


Рис. 1. Структура математической модели цифровой системы управления

сунков 3 и 5 следует, что электроприводы с номинальными угловыми скоростями 5 и 60 град/с работают в режиме насыщения управляющего воздействия. Однако при этом процессы в системе являются не расходящимися, что свидетельствует об её устойчивости в «большом» и адекватности ПИД-регулятора решаемой технической задаче.

Для электропривода с номинальной угловой скоростью 80 град/с, как следует из рисунка 7, режим насыщения управляющего воздействия не характерен. Таким образом, цифровой следящей системе со столь большой номинальной угловой скоростью электропривода свойственен режим, близкий к линейному, и, следовательно, по точности эта система будет близка к винеровской.

Из рисунков 4 и 6 следует, что значение ошибки дискретной нелинейной системы тем меньше, чем больше значение статического коэффициента передачи электропривода по скорости.

Сведения о точности систем с различными угловыми скоростями электроприводов приведены в таблице.

Анализ рисунков 2 – 7 и данных, приведённых в таблице, показывает следующее. В случае, когда цифровая система с ограничением по управлению работает в режиме насыщения управляющего воздействия [см. рис. 3 ( $k_{ЭМ} = 5$  град/В с,  $k = 10^4$ ) и рис. 5 ( $k_{ЭМ} = 60$  град/В с,  $k = 10^4$ )], в системе наблюдается проигрыш в точности по сравнению с линейной цифровой систе-

мой без ограничения управления, который, например, для величины  $k_{ЭМ} = 10$  град/В с ориентировочно равен 2. Если для цифровой системы с ограничением по управлению не характерен режим насыщения управляющего воздействия (см. рис. 7,  $k_{ЭМ} = 80$  град/В с,  $k = 10^4$ ), то проигрыш в точности по сравнению с линейной цифровой системой составляет примерно 5%.

В режиме высокой точности, когда отношение сигнал/шум равно  $10^5$  и  $k_{ЭМ} = 60..80$  град/В с, проигрыш в точности цифровой системы с ограничением по управлению по сравнению с цифровой системой без ограничения управления составляет примерно 8%. При этом среднеквадратическая ошибка приблизительно равна 2,3 угловой секунды.

При отношении сигнал/шум, равном  $10^6$ , для цифровой системы с ограничением по управлению, номинальная угловая скорость электропривода которой превышает 10 град/с, обеспечивается среднеквадратическая угловая ошибка, не превышающая одну угловую секунду.

### Выводы

Результаты моделирования нелинейной системы с управляющим устройством, реализованным с помощью современной ЭВМ, показали эффективность применения ПИД-регулятора даже в случае реализации его элементов на основе простейших разностных схем, поскольку при этом обеспечивается устойчи-

#### Зависимость среднеквадратической ошибки нелинейной цифровой следящей системы от отношения сигнал/шум и значения статического коэффициента передачи электропривода

k	$\sigma_e$ (угл. с)								
	Непрерывная (винеровская) система без ограничения по управлению	Цифровая система без ограничения управления	Цифровая система с ограничением по управлению $k_{ЭМ}$ (град/В с)						
			$k_{ЭМ} = 5$	$k_{ЭМ} = 10$	$k_{ЭМ} = 20$	$k_{ЭМ} = 60$	$k_{ЭМ} = 70$	$k_{ЭМ} = 80$	
$10^4$	2,54	6,45	15,0	12,0	9,8	6,78	6,75	6,74	
$10^5$	1,07	2,13	4,10	3,34	2,57	2,31	2,30	2,30	
$10^6$	0,45	0,75	1,25	1,00	0,87	0,86	0,864	0,864	

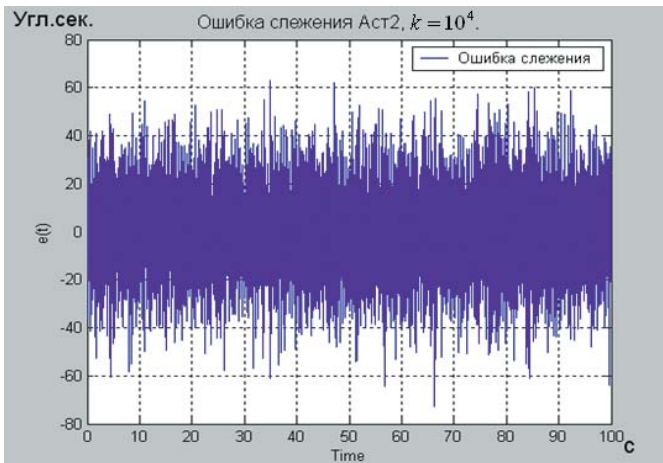


Рис. 2. Зависимость ошибки нелинейной следящей системы от времени для  $k_{3M} = 5$  град/В с

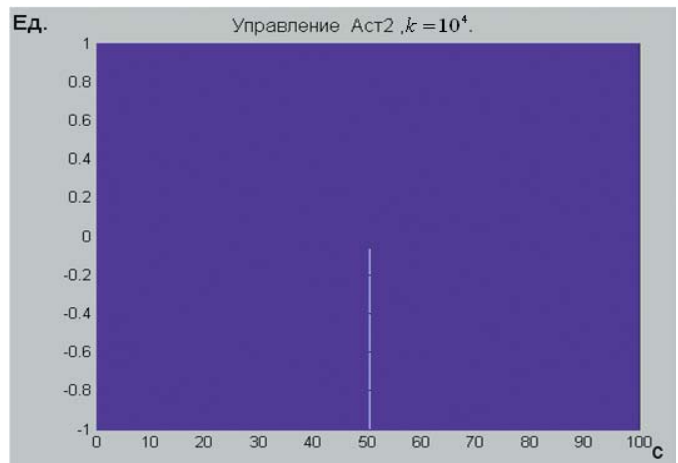


Рис. 3. Зависимость управляющего воздействия нелинейной следящей системы от времени для  $k_{3M} = 5$  град/В с

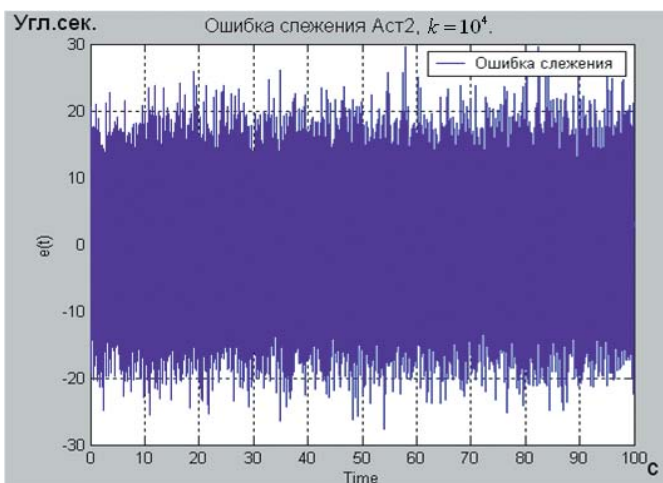


Рис. 4. Зависимость ошибки нелинейной следящей системы от времени для  $k_{3M} = 60$  град/В с

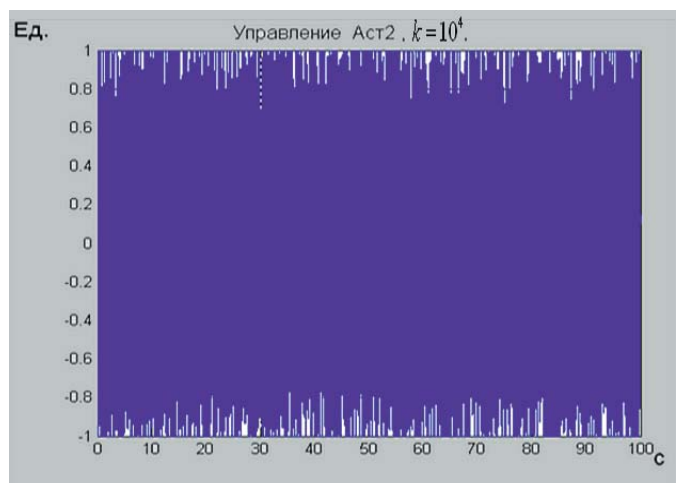


Рис. 5. Зависимость управляющего воздействия нелинейной следящей системы от времени для  $k_{3M} = 60$  град/В с

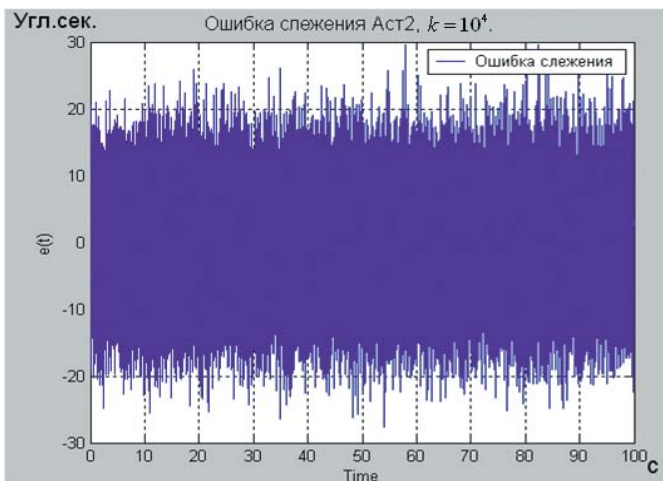


Рис. 6. Зависимость ошибки нелинейной следящей системы от времени для  $k_{3M} = 80$  град/В с

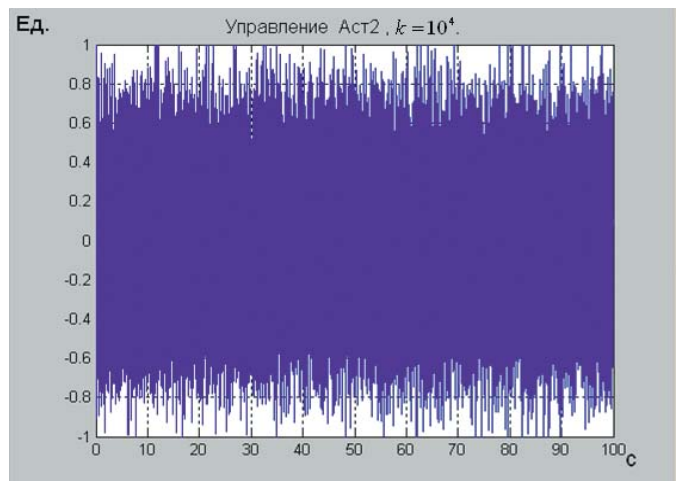


Рис. 7. Зависимость управляющего воздействия нелинейной следящей системы от времени для  $k_{3M} = 80$  град/В с

вость в «большом» как состояний равновесия, так и вынужденных процессов. Потеря точности по сравнению с цифровой линейной системой не превышает 5...8% для номинальных угловых скоростей электропривода 60...80 град/с. Важно, что при вхождении системы в ре-

жим практически полного насыщения управляющего воздействия, вызванного влиянием высокого уровня шума углового координатора, не возникают аномальные ошибки слежения, свойственные критическим режимам работы нелинейных автоматических систем.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Гелозе Ю.А., Маркович И.И., Чуйков В.М. Цифровое формирование управляющих сигналов оптимальной следящей системы. Современная электроника. 2006. № 3. С. 48–51.
2. Современные системы управления. Лаборатория Базовых Знаний, 2002.

## Marvel доведёт скорость Wi-Fi до 450 Мбит/с

Компания Marvell начала новый 2008 г. с очередного пополнения в линейке наборов системной логики для беспроводного сетевого оборудования TopDog. Согласно заявлению разработчиков, новый чипсет увеличит скорость передачи данных по беспроводному протоколу Wi-Fi 802.11n с текущих 300 Мбит/с до 450 Мбит/с, т.е. на весомые 50%. Увеличивается и радиус действия сети: на 160% по сравнению с устройствами Wi-Fi 802.11n и в пять раз по сравнению с аналогами, работающими по стандарту Wi-Fi 802.11g.



Технически чипсет совместим с черновым стандартом 802.11n, равно как и с более ранними, и обладает рядом технологических нововведений, которые призваны увеличить надёжность передачи данных на больших скоростях, например, Special Time Block Coding. Сам чип произведён с применением 90-нм проектных норм, что позволяет надеяться на меньшее по сравнению с его предшественниками энергопотребление.

Компания планирует начать отгрузку чипов весной текущего года, надеясь увидеть свое детище в составе ноутбуков, медиа-концентраторов, игровых консолей и сетевых маршрутизаторов. Пока ни один из производителей сетевого оборудования не заявил о намерении использовать 450-Мбит TopDog в составе своих продуктов.

*electronista.com*

## Спецификация WirelessHD 1.0 вышла в свет

Инициативная группа по продвижению стандарта короткодистанционной беспроводной связи WirelessHD, состоящая на данный момент из компаний Intel, LG Electronics, Matsushita Electric Industrial (Panasonic), NEC, Samsung Electronics, SiBEAM, Sony и Toshiba, объявила об официальном выходе первой версии спецификации. Ожидается, что уже в ближайшее время её полная версия станет доступной для производителей.

Напомним, что WirelessHD является протоколом высокоскоростной передачи данных на небольшие расстояния, использующим нелицензируемый диапазон 60 ГГц. Протокол разработан для поддержки беспроводной передачи контента высокого качества и рассчитан на применение в составе домашних мультимедийных приложений. Скорость обмена данными между устройствами, поддерживающими протокол, может достигать 4 Гбит/с.

Завершение разработки спецификации версии 1.0 даёт зелёный свет разработчикам устройств – о поддержке WirelessHD с момента анонса протокола в октябре 2006 г. заявило уже более 40 компаний. В спецификации также заложены алгоритмы работы с зашифрованным содержимым и предусмотрено использование единого беспроводного пульта управления для WirelessHD-устройств.

*wirelesshd.org*

## Mitsubishi научила проекторы воспроизводить 3D-картинку

Сегодня разработчики устройств отображения информации ставят своей задачей создание трёхмерных дисплеев и к этому моменту достигли определённых успехов – некоторые решения уже попали на мировой рынок. Но большинство из этих моделей требуют использования специальных поляризационных фильтров, разделяющих изображение для левого и правого глаза пользователя. А вот устройства, способные формировать действительно трёхмерное изображение, пока находятся на стадии разработки и не готовы выйти на мировой рынок не только из-за «сырости» технологии, но и в связи с высокой стоимостью систем.

Очередную технологию представили сотрудники Mitsubishi Electric Research Laboratories, которая позволяет получать трёхмерное изображение при помощи массива из пятнадцати проекторов, подключенных к восьми рабочим станциям, рассчитывающим изображение для каждого из проекторов. И по всей видимости, секрет технологии скрыт именно в программном обеспечении, ведь используются самые обычные цифровые проекторы, не способные на уникальные «подвиги». К сожалению, разработчики пока не раскрывают всех подробностей технологии, но, несмотря

на сложность и высокую стоимость всей системы, она способна воспроизвести 3D-картинку.

Главное достоинство такого подхода – отсутствие необходимости в использовании специальных очков, возможность наблюдения 3D-картинки для неограниченного количества пользователей, возможность масштабирования системы для получения более качественного изображения.

*http://www.3dnews.ru*

## QFHD- и OLED-телевизоры Samsung

Как и было обещано, на выставке CES 2008 компания Samsung представила две интересные OLED-панели с диагоналями 14" и 31". До сих пор о характеристиках новинок было известно немного, но теперь Samsung согласилась раскрыть некоторые детали.

На стенде Samsung демонстрируются новые ультратонкие OLED-телевизоры, которые используют активно-матричные OLED-панели (AM OLED) разработки Samsung SDI – подразделения компании Samsung Electronics, отвечающего за развитие новых дисплейных технологий, создание телевизоров, дисплеев для широкого спектра электронных устройств. Новинки легче на 40% по сравнению с аналогичными по размеру ЖК-телевизорами, отличаются высоким коэффициентом контрастности 1 000 000 : 1, цветовым охватом 107% и яркостью 550 нит. Samsung начнёт серийное производство OLED-телевизоров среднего и крупного размера ближе к 2010 г.

На стенде Samsung также демонстрируется прототип 52-дюймового жидкокристаллического телевизора, который является, по заявлению производителя, самым тонким «не OLED»-телевизором в мире, хотя никаких данных о его толщине почему-то не предоставлено. Контрастность новинки составляет 50 000 : 1, яркость – 550 нит. Массовое производство намечено на 2009 г.

Также на выставке представлена ещё одна интересная разработка – 82-дюймовый телевизор с разрешением QFHD (quadruple full high definition) 3840 × 2160 пикселей, которое в четыре раза превышает традиционный формат Full HD. Samsung уверена, что на сегодняшний день это самый большой ЖК-телевизор в мире с таким высоким разрешением.

*Reuters, Pocket-lint*