

Санкт-Петербургский государственный университет

Кафедра Системного Программирования

Группа 20Б.11-мм

Мотыка Артем Игоревич

Navitas Framework. Энергопотребление экранов смартфонов

Отчёт по учебной практике
в форме «Решение»

Научный руководитель:
старший преподаватель С.Ю. Сартасов

Санкт-Петербург
2022

Оглавление

1. Введение	3
2. Постановка задачи	4
3. Обзор	5
3.1. Обзор различных типов матриц для смартфонов	5
3.2. Navitas Framework, модуль энергопотребления дисплея .	9
3.3. Имеющиеся работы по энергопотреблению экранов . . .	9
4. Построение модели энергопотребления экрана	12
4.1. Приложение для проведения эксперимента по энергопотреблению экрана на испытательном стенде	12
4.2. Получение данных	13
4.3. Аппроксимация	13
4.4. Построение модели энергопотребления экрана	14
4.5. Модель энергопотребления AMOLED-экрана для одного пикселя	17
4.6. Апробация модели энергопотребления экрана смартфона	18
4.7. Интеграция модели энергопотребления экрана в Navitas Framework	20
5. Заключение	21
Список литературы	47

1. Введение

Экран является одним из важнейших компонентов в смартфоне. Он может потреблять до 50% и выше всего заряда смартфона, в зависимости от яркости экрана, его размера, типа экрана, частоты обновления экрана и от той картинки, которая показывается на нем [2, 6].

В 2014 году Qualcomm в своем процессоре Snapdragon 800 MSM8974 имели техпроцесс 28 нм, сейчас же у Qualcomm есть процессор Snapdragon 888 с техпроцессом 5 нм. Техпроцесс мобильных процессоров за последние 7 лет уменьшился в 5.8 раз [14]. Уменьшение техпроцесса, а также появление энергоэффективных ядер стремительно уменьшает энергопотребление мобильных процессоров. В это же время энергопотребление экранов практически не менялось или менялось, но не так сильно, как в мобильных процессорах.

Изменение экранов смартфонов в сторону увеличения площади занимаемой поверхности, появление тенденции к увеличению частоты обновления экранов и их разрешения, ведет к увеличению их энергопотребления.

Все приведенные выше аргументы доказывают важность и актуальность изучения энергопотребления экранов.

Проект Navitas Framework [7] позволяет оценивать энергопотребление различных модулей смартфона. В настоящее время в Navitas Framework уже присутствует модель энергопотребления экрана, но она не учитывает тип экрана и соответственно не совсем корректно показывает данные об энергопотреблении экрана, поэтому в этой работе предлагается усовершенствовать старую модель энергопотребления экрана.

Модель энергопотребления экрана создаст возможности для оптимизации дизайна операционных систем мобильных устройств, с целью повышения энергоэффективности экранов.

2. Постановка задачи

Целью данной работы является изучение зависимости энергопотребления разных типов экранов от показываемого ими изображения и добавление в Navitas Framework более качественной модели энергопотребления экрана.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Сделать обзор разных типов экранов смартфонов, посмотреть на их энергопотребление и найти зависимости энергопотребления экранов от цветов пикселей и уровня яркости экрана;
2. Разработать Android-приложение для проведения эксперимента по изучению энергопотребления AMOLED-экрана (приложение должно отображать различные цвета на протяжении какого-то фиксированного времени);
3. Провести замеры энергопотребления при различных отображаемых цветах экрана и уровнях яркости на тестовом смартфоне с AMOLED-матрицей;
4. На основе полученных данных разработать модель энергопотребления экрана смартфона и встроить её в Navitas Framework;
5. Провести апробацию указанной модели энергопотребления экрана смартфона;

3. Обзор

3.1. Обзор различных типов матриц для смартфонов

Начнем разбор в предметной области с того, какие бывают экраны и какие из них используются в смартфонах.

В производстве смартфонов в основном используются LED и OLED-матрицы, что делает их более интересными для исследования.

LED (liquid crystal display) — данный тип матрицы до недавнего времени был самым популярным среди телефонов. LED — панель из нескольких листов поляризационного материала с жидкокристаллическим раствором между ними, который регулирует прохождения света. Жидкие кристаллы не излучают свет напрямую вместо этого используют подсветку или отражатель для получения цветных или монохромных изображений [4]. Самым распространенным типом подсветки LCD-экрана является LED-подсветка, основанная на работе светодиодов. LCD-LED — это LCD, подсветка которого состоит из светодиодов. Одним из самых распространенных типов LCD-LED-дисплеев в смартфонах является IPS-дисплей. Энергопотребление IPS-матриц, собственно как и у любых LCD-матриц, не зависит от цветов пикселей на экране, так как основная часть энергии уходит на подсветку таких дисплеев [11].

Совсем другой тип экрана — это OLED (organic light-emitting diode). Данная технология основывается на органический светодиодах. В такой матрице каждый субпиксель (зеленый, красный, голубой) является отдельным источником света, вследствие чего энергопотребление таких экранов будет зависеть от отображаемых цветов пикселей на экране. Первые OLED-матрицы потребляли слишком много энергии, потому что были пассивными PMOLED (Passive Matrix OLED), то есть электричество у них подавалось на целую полосу пикселей, при этом активизировались только те пиксели, которые находятся на пересечении двух полос. В AMOLED (Active Matrix OLED) же экранах, кото-

рые заменили PMOLED, на подложку матрицы внесли TFT (thin-film transistor) слой и теперь каждый пиксель загорается по команде отдельного транзистора [9]. Технология изготовления AMOLED-матриц постоянно совершенствовалась и становилась все более доступной и с недавнего времени начала быстро захватывать рынок смартфонов.

AMOLED-экраны бывают тоже разными с точки зрения расположения субпикселей, их количества и размера. Существуют две схемы расположения субпикселей: первая это классическая схема, где количество зеленых, красных и синих субпикселей не отличается, а вторая схема называется PenTile. PenTile — это такой порядок расположения субпикселей на OLED-экране, когда к классической схеме добавляются либо белые субпиксели для повышения яркости (в смартфонах практически не используется), либо зеленые, а именно два зеленых субпикселя на один пиксель. В зависимости от расположения пикселей и их размера можно добиться большего разрешения, но при этом четкость картинки уменьшится [19, 10]. Из-за неравного количества зеленых субпикселей по отношению к красными и синим энергопотребление такого экрана может различаться с обычным классическим AMOLED-экраном при отображении одной и той же картинки.

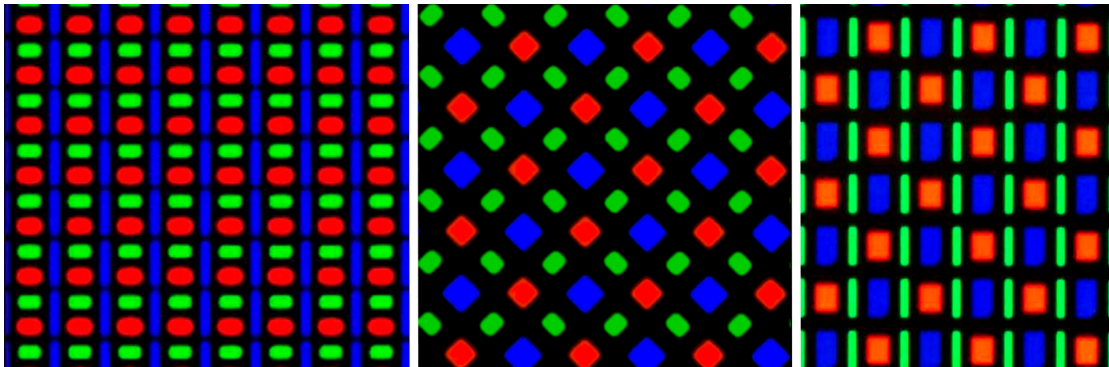


Рис. 1: Классическая и PenTile схемы OLED

Для регулировки яркости в AMOLED-экранах используется технология ШИМ. ШИМ — широтно-импульсная модуляция — процесс управления мощностью методом пульсирующего включения и выключения потребителя энергии [20]. Основной причиной применения ШИМ

является повышение КПД в электрической цепи, также ШИМ используются в OLED, так как эта технология более проста чем регулирование напряжения напрямую, помимо этого ШИМ позволяет передавать более широкий диапазон яркости при неизменной цветопередаче экрана. Кроме того ШИМ позволяет продлить время работы диодов. Несмотря на все плюсы ШИМ, эта технология может влиять на энергопотребление экрана при разных уровнях яркости, поэтому одной из целей практики будет проверка зависимости энергопотребления от уровня яркости AMOLED-экрана [20], [1].

Так как цвет в AMOLED — это разный органический материал, то какой-то цвет в AMOLED-матрице может потреблять больше или меньше энергии, чем другие цвета, по результатам статьи Deguang Li, Bing Guo и коллег [3] таким цветом является синий цвет. Он потребляет вдвое и более энергии, чем зеленый и красный. Причем энергопотребление зеленого и красного в эксперименте никак не отличалось [3, 11].

Одним из самых важных цветов, при рассмотрении AMOLED-экрана, является черный цвет. Так как при отображении черного цвета пиксели в AMOLED-матрице находятся в выключенном состоянии, то и потребление энергии при отображении черного у AMOLED-матрицы будет минимальным по сравнению с другими цветами. Вопрос состоит только в том, насколько черный цвет потребляет меньше энергии в сравнении с темно-серым и насколько оправданно делать интерфейс приложений черным, может быть, лучше использовать более приятный глазу темно-серый, пусть он и будет потреблять больше энергии. На самом деле в ходе эксперимента статьи [12] выяснилось, что при отображении черного цвета AMOLED-матрица не подает никакого электричества на светодиоды, но при этом контроллер экрана продолжает потреблять энергию. Например, у дисплея OnePlus 7 Pro контроллер потребляет 400 мВт и дополнительные 4 мВт на нит (единица яркости). Следовательно, полностью черный экран будет потреблять 400 мВт. При рассмотрении темно-серого цвета возьмем цвет Google Material Dark Theme, который компания Google использует в темной теме своей операционной системы Android. Код такого цвета в RGB будет выглядеть так: (7%,7%,7%).

Можно подумать, что такой серый будет потреблять 7% от мощности белого, но это не так. Энергопотребление пикселя связано не линейно с его кодом в RGB, существует так называемая гамма-коррекция. Стандартная гамма-коррекция дисплеев равна 2.2, эта константа нужна для определения мощности потребления каждого субпикселя. Таким образом, темно-серый Google Material Dark Theme будет потреблять мощность не 7% от белого, а $(0.07^{2.2}) * 100 = 0.29\%$ от мощности белого цвета. Следовательно энергопотребление темно-серого Google Material Dark Theme при 100 нит яркости будет равно $400 \text{ мВт} + 4 \text{ мВт} * 0.29 = 401.16 \text{ мВт}$ [12]. Из теоретического предположения можно видеть, что энергопотребление черного и темно-серого практически не отличается, а значит можно использовать более приятный человеческому глазу темно-серый цвет вместо глубокого черного. Осталось проверить эти теоретические знания на практике, поставив эксперимент на энергопотребление экрана с отображением различных оттенков серого.

Кроме LCD и AMOLED-экранов есть и другие технологии, а именно MiniLED и MicroLED-матрицы. Эти матрицы более энергоэффективны чем OLED и LCD-LED, но их производство довольно сложное и дорогое, поэтому эти матрицы не используются повсеместно в смартфонах.

MiniLED-дисплеи — это LCD-LED-дисплеи, у которых подсветка выполнена в виде мини-LED зон, которые загораются в зависимости от того, какая картинка показывается на экране. Такие дисплеи хорошо отображают HDR контент, делая темные места изображения по-настоящему темными, не меняя при этом четкость картинки, а светлые участки по-настоящему светлыми. У такого типа дисплея энергопотребление будет зависеть от картинки, которую он показывает и, как следствие, он является более энергоэффективным, чем LCD-LED [5].

MicroLED-дисплеи по своей структуре напоминают AMOLED-экраны. У таких дисплеев каждый субпиксель — это отдельный источник света, но субпиксели в отличие от AMOLED-дисплеев здесь неорганические. Неорганические пиксели гораздо меньше органических, они более устойчивы к выгоранию, являются более энергоэффективными, они более контрастны, имеют более насыщенный цвет и меньшую задержку в

сравнении с OLED. Энергопотребление таких дисплеев будет зависеть от картинки, которую показывает смартфон [16, 13, 8].

3.2. Navitas Framework, модуль энергопотребления дисплея

Navitas Framework — это инструмент для для оценки энергопотребления Android-смартфона. В Navitas Framework уже имеется модель энергопотребления экрана смартфона. В этой модели не учитываются типы экранов, из-за чего получаемые данные об энергопотреблении экрана не совсем корректны. В этой работе предлагается расширить и улучшить модель энергопотребления экрана, используя экспериментальные данные, полученные на смартфоне с AMOLED-экраном.

3.3. Имеющиеся работы по энергопотреблению экранов

Статьи искались в поисковой системе Google по ключевым словам: energy consumption, screen, display, amoled, dependence, screen color и др.

В статье Deguang Li, Bing Guo и коллег "Making Image More Energy Efficient for OLED Smart Devices" [3] производится тест энергопотребления AMOLED-экрана на экспериментальной платформе.

OLED	Измеритель мощности	Источник питания
µOLED-32028-P1 AMOLED	ОЙКИ 3334	КА3005П DC
Разрешение 320 × 240	Частота отбора проб 74,4 кГц	Диапазон напряжения 0 В–30 В
Цвет дисплея 65 К цветов	Точность измерения $\pm 0,5\%$ rdg	Диапазон тока 0 А–5 А
Размер диагонали 2,83 дюйма	Диапазон измерений 1,5000 Вт–9,000 кВт	Точность настройки Напряжение: $\leq 0,5\% + 20$ мВ Ток: $\leq 0,5\% + 10$ мА

Рис. 2: Экспериментальная платформа [17]

В статье приводятся данные энергопотребления красного, зеленого

и синего цветов в виде графика

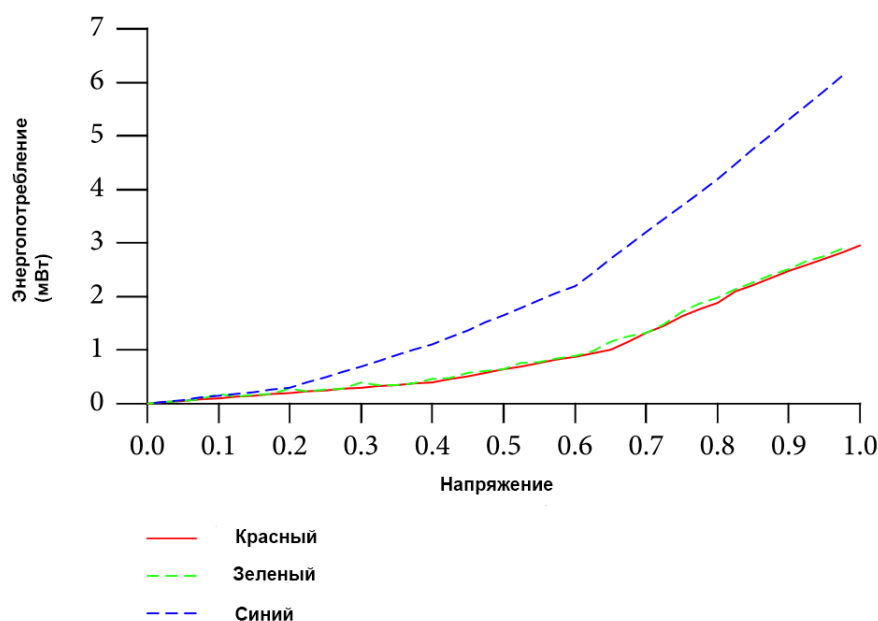


Рис. 3: График энергопотребления синего, зеленого, красного цветов [18]

Данные на графике не позволяют построить полноценную модель энергопотребления экрана смартфона, из-за того что на графике нельзя разглядеть точные данные по энергопотреблению, также в эксперименте не участвуют оттенки серого, энергопотребление которых тоже хотелось бы уточнить. Экспериментальную платформу тоже нельзя назвать совсем честной, так как она не является смартфоном и её разрешение и PPI (Pixels Per Inch) слишком мало для современных смартфонов.

В статье Olivier Philippot "Should you switch your wallpaper to affect less the battery life of your smartphone?" [11] производятся измерения энергопотребления OLED и LCD-LED-экранов на устройствах Nexus 6, Samsung Galaxy S6, Nexus 5, Nexus 9, Pixel C, предоставляются 3d графики (по цвету, яркости и энергопотреблению) двух типов экранов. Также предоставляются измерения энергопотребления белого цвета в зависимости от яркости экрана на всех 6 устройствах. Статья довольно хорошо показывает отличия между OLED и LCD-LED-экранами, но не предоставляет точных данных для построения модели энергопотребления.

В статье Aaron Carroll, Gernot Heiser "An Analysis of Power Consumption in a Smartphone" [2] используются два девайса: HTC Dream с LCD-экраном и Google Nexus One с AMOLED-экраном. В статье производятся различные тесты смартфонов при проигрывании аудио, видео, при телефонном звонке, при отправлении сообщений, при использовании браузера и т.п. Какие-то данные можно извлечь из графиков этой статьи, но все же измерения нацелены не на получение данных об энергопотреблении экранов и поэтому не дают полной информации о них. Также устройства, над которыми проводились тесты, являются устаревшими и они неактуальны для построения модели для современных смартфонов.

4. Построение модели энергопотребления экрана

4.1. Приложение для проведения эксперимента по энергопотреблению экрана на испытательном стенде

В течение осеннего семестра было сделано приложение, которое покрывает все потребности для проведения эксперимента над смартфоном с AMOLED-экраном. Эксперимент будет проводиться на смартфоне Samsung Galaxy A3 (2016) с AMOLED-экраном, на нем будет запущено приложение [15], сам смартфон будет подключен к внешнему измерительному прибору для определения энергопотребления при различных цветах и яркости экрана (цвета экрана будут меняться через приложение [15]).

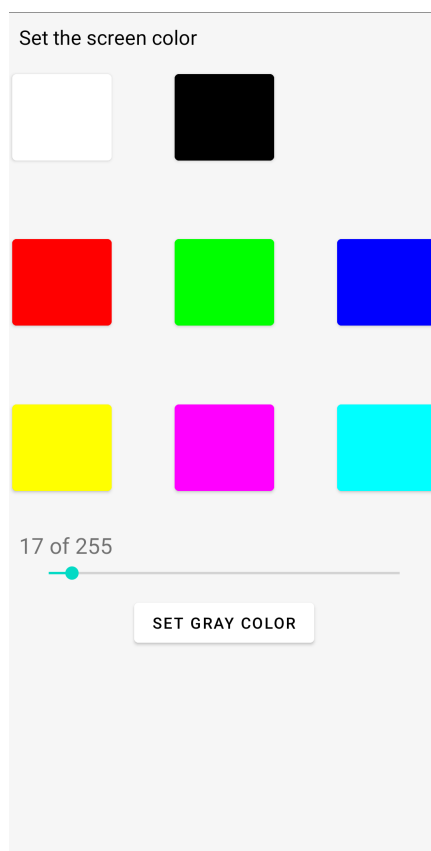


Рис. 4: Приложение для проведения эксперимента [15]

4.2. Получение данных

В течение весеннего семестра были получены данные с экспериментальной установки, включающей в себя: смартфон Samsung Galaxy A3 2016 (sm-a320f) с AMOLED-экраном, мультиметр и генератор напряжения. Были сделаны замеры энергопотребления белого, черного, красного, зеленого, синего, $\text{rgb}(255, 255, 0)$, $\text{rgb}(255, 0, 255)$, $\text{rgb}(0, 255, 255)$, $\text{rgb}(17, 17, 17)$, $\text{rgb}(34, 34, 34)$, $\text{rgb}(68, 68, 68)$, $\text{rgb}(136, 136, 136)$, $\text{rgb}(204, 204, 204)$ цветов при разных уровнях яркости экрана: 0, 42, 84, 126, 168, 210, 255. После, были взяты средние арифметические значения для упрощения работы с числами.

4.3. Аппроксимация

Над упомянутыми выше данными, а именно над средними значениями, была проделана аппроксимация показательной функцией $a * e^{b*x}$ методом наименьших квадратов. В результате чего были получены следующие функции:

$$yw(x) = 0.0109 * e^{0.0129*x},$$

$$yr(x) = 0.0091 * e^{0.0083*x},$$

$$yg(x) = 0.0067 * e^{0.0097*x},$$

$$ybl(x) = 0.0125 * e^{0.0094*x},$$

$$yy(x) = 0.0117 * e^{0.0104*x},$$

$$yp(x) = 0.0111 * e^{0.0119*x},$$

$$yc(x) = 0.0154 * e^{0.0104*x},$$

$$yg68(x) = 0.0017 * e^{0.0067*x},$$

$$yg136(x) = 0.0053 * e^{0.0095*x},$$

$$yg204(x) = 0.0084 * e^{0.0123*x},$$

зависящие от уровня яркости экрана и показывающие его энергопотребление в амперах (не включая энергопотребление контроллера экрана) так, если бы экран отображал белый, красный, зеленый, синий, $\text{rgb}(255, 255, 0)$, $\text{rgb}(255, 0, 255)$, $\text{rgb}(0, 255, 255)$, $\text{rgb}(68, 68, 68)$, $\text{rgb}(136, 136, 136)$, $\text{rgb}(204, 204, 204)$ цвета соответственно.

Для черного цвета ($y_b(x)$), который не потребляет энергию, в качестве функции было взято среднее арифметическое замеров энергопотребления контроллера экрана.

Для цветов $rgb(17, 17, 17)$ ($y_{g17}(x)$), $rgb(34, 34, 34)$ ($y_{g34}(x)$), энергопотребление которых не сильно зависит от яркости экрана, в качестве функции энергопотребления было решено взять среднее арифметическое потребление данных цветов (не включая энергопотребление контроллера экрана).

Был произведен расчет средней ошибки аппроксимации для приближаемых функций, а именно, было найдено относительное среднее отклонение между фактическим и расчетными значениями функций.

$$\Delta = \frac{\sum \frac{|y_t - y_w(x)|}{y_t}}{n};$$

Функция	Δ
$y_w(x)$	0.2535
$y_r(x)$	0.0578
$y_g(x)$	0.1429
$y_{bl}(x)$	0.0942
$y_u(x)$	0.1598
$y_p(x)$	0.1903
$y_c(x)$	0.1403
$y_{g68}(x)$	0.5135
$y_{g136}(x)$	0.1138
$y_{g204}(x)$	0.1983

Все Δ кроме Δ функции $y_{g68}(x)$ показывают, что значения расходятся в среднем на величину, сравнимой с величиной погрешности прибора измерения. Δ для функции $y_{g68}(x)$ довольно велика, но из-за очень маленьких значений функции $y_{g68}(x)$ таким большим Δ можно пренебречь, было решено оставить данное приближение.

4.4. Построение модели энергопотребления экрана

В ходе замеров было обнаружено, что разница между энергопотреблением белого и суммой всех его компонент: красного, зеленого, сине-

го – отличается. Были найдены соответствующие разницы для белого, $\text{rgb}(255, 255, 0)$, $\text{rgb}(255, 0, 255)$, $\text{rgb}(0, 255, 255)$ цветов соответственно, а именно:

$$ydiffW = yw(X) - yr(X) - yg(X) - ybl(X),$$

$$ydiffY = yy(X) - yr(X) - yg(X),$$

$$ydiffP = yp(X) - yr(X) - ybl(X),$$

$$ydiffC = yc(X) - yg(X) - ybl(X).$$

Разность белого и суммы его компонент зависит от яркости. Аналогично с другими цветами, состоящие из нескольких компонент. Такое различие может быть объяснено тем, что если объединить 3 пикселя, которые излучают по 2 нит яркости каждый, получится в совокупности больше чем 2 нит, а значит, получится другой уровень яркость, который не соответствует яркости одного такого пикселя, а значит энергопотребление суммы таких пикселей будет больше.

Были вычислены отношения белого, $\text{rgb}(255, 255, 0)$, $\text{rgb}(255, 0, 255)$, $\text{rgb}(0, 255, 255)$ цветов к суммам их компонент, а именно:

$$yQW = \frac{yw(X)}{yw(X) - ydiffW(X)},$$

$$yQY = \frac{yy(X)}{yy(X) - ydiffY(X)},$$

$$yQP = \frac{yp(X)}{yp(X) - ydiffP(X)},$$

$$yQC = \frac{yc(X)}{yc(X) - ydiffC(X)}.$$

Также был вычислен средний коэффициент:

$yQmid = (3 * yQW(X) + yQY(X) + yQP(X) + yQC(X))/6$, который использует yQW , yQY , yQP , yQC . Большая доля берется именно отношения белого цвета к сумме компонент, так как в основном все цвета состоят из трех компонент.

Были построены методом Лагранжа интерполяционные многочлены по значениям энергопотребления серого разной степени интенсивности от черного до белого для разных уровней яркости (0, 42, 84, 126, 168, 210, 255) соответственно:

$$\begin{aligned}
yGk0 &= 3.54727978707 * 10^{-13} * X * (X - 68) * (X - 136) * (X - 204) * \\
&(X - 255) - 4.27307683393 * 10^{-13} * X * (X - 34) * (X - 136) * (X - 204) * \\
&(X - 255) + 6.96866983007 * 10^{-13} * X * (X - 34) * (X - 68) * (X - 204) * (X - \\
&255) - 5.16285666076 * 10^{-13} * X * (X - 34) * (X - 68) * (X - 136) * (X - \\
&255) + 1.71398554112 * 10^{-13} * X * (X - 34) * (X - 68) * (X - 136) * (X - 204) \\
yGk42 &= 3.54727978707 * 10^{-13} * X * (X - 68) * (X - 136) * (X - 204) * \\
&(X - 255) - 5.67681601750 * 10^{-13} * X * (X - 34) * (X - 136) * (X - 204) * \\
&(X - 255) + 1.03868441054 * 10^{-12} * X * (X - 34) * (X - 68) * (X - 204) * (X - \\
&255) - 8.68418091624 * 10^{-13} * X * (X - 34) * (X - 68) * (X - 136) * (X - \\
&255) + 2.94760572354 * 10^{-13} * X * (X - 34) * (X - 68) * (X - 136) * (X - 204) \\
yGk84 &= 3.54727978707 * 10^{-13} * X * (X - 68) * (X - 136) * (X - 204) * \\
&(X - 255) - 7.54169450939 * 10^{-13} * X * (X - 34) * (X - 136) * (X - 204) * \\
&(X - 255) + 1.54816533284 * 10^{-12} * X * (X - 34) * (X - 68) * (X - 204) * (X - \\
&255) - 1.46072229275 * 10^{-12} * X * (X - 34) * (X - 68) * (X - 136) * (X - \\
&255) + 5.06910898197 * 10^{-13} * X * (X - 34) * (X - 68) * (X - 136) * (X - 204) \\
yGk126 &= 3.54727978707 * 10^{-13} * X * (X - 68) * (X - 136) * (X - 204) * \\
&(X - 255) - 1.00192001815 * 10^{-12} * X * (X - 34) * (X - 136) * (X - 204) * \\
&(X - 255) + 2.30754969795 * 10^{-12} * X * (X - 34) * (X - 68) * (X - 204) * (X - \\
&255) - 2.45700732987 * 10^{-12} * X * (X - 34) * (X - 68) * (X - 136) * (X - \\
&255) + 8.71753832811 * 10^{-13} * X * (X - 34) * (X - 68) * (X - 136) * (X - 204) \\
yGk168 &= 3.54727978707 * 10^{-13} * X * (X - 68) * (X - 136) * (X - 204) * \\
&(X - 255) - 1.33105858574 * 10^{-12} * X * (X - 34) * (X - 136) * (X - 204) * \\
&(X - 255) + 3.43941664082 * 10^{-12} * X * (X - 34) * (X - 68) * (X - 204) * (X - \\
&255) - 4.13280816559 * 10^{-12} * X * (X - 34) * (X - 68) * (X - 136) * (X - \\
&255) + 1.49918801849 * 10^{-12} * X * (X - 34) * (X - 68) * (X - 136) * (X - 204) \\
yGk210 &= 3.54727978707 * 10^{-13} * X * (X - 68) * (X - 136) * (X - 204) * \\
&(X - 255) - 1.76832174881 * 10^{-12} * X * (X - 34) * (X - 136) * (X - 204) * \\
&(X - 255) + 5.12647109603 * 10^{-12} * X * (X - 34) * (X - 68) * (X - 204) * (X - \\
&255) - 6.95158826985 * 10^{-12} * X * (X - 34) * (X - 68) * (X - 136) * (X - \\
&255) + 2.57821030456 * 10^{-12} * X * (X - 34) * (X - 68) * (X - 136) * (X - 204)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
yGk255 = & 3.54727978707 * 10^{-13} * X * (X - 68) * (X - 136) * (X - 204) * \\
& (X - 255) - 2.39738138243 * 10^{-12} * X * (X - 34) * (X - 136) * (X - 204) * \\
& (X - 255) + 7.86200323810 * 10^{-12} * X * (X - 34) * (X - 68) * (X - 204) * (X - \\
& 255) - 1.21354023235 * 10^{-11} * X * (X - 34) * (X - 68) * (X - 136) * (X - \\
& 255) + 4.60892146870 * 10^{-12} * X * (X - 34) * (X - 68) * (X - 136) * (X - 204)
\end{aligned}$$

Можно видеть из графиков данных многочленов, что энергопотребление зависит так же и от интенсивности цвета, то есть его кода rgb , чем он больше, тем больше интенсивность цвета. По графикам видно, что энергопотребление зависит не линейно от интенсивности цвета и чем больше яркость, тем заметнее это проявляется.

Были построены коэффициенты данных многочленов, которые являются отношением многочлена на его максимум.

Коэффициенты-многочлены вида:

$$\begin{aligned}
yGki0 &= \frac{yGk0(X)}{yw(0)} \\
yGki42 &= \frac{yGk42(X)}{yw(42)} \\
yGki84 &= \frac{yGk84(X)}{yw(84)} \\
yGki126 &= \frac{yGk126(X)}{yw(126)} \\
yGki168 &= \frac{yGk168(X)}{yw(168)} \\
yGki210 &= \frac{yGk210(X)}{yw(210)} \\
yGki255 &= \frac{yGk255(X)}{yw(255)}
\end{aligned}$$

4.5. Модель энергопотребления AMOLED-экрана для одного пикселя

$$\frac{yQmid(i) * (yGki[br[i]](rgb[0]) * yr(i) + yGki[br[i]](rgb[1]) * yg(i) + yGki[br[i]](rgb[2]) * ybl(i)) + yb(i)}{921600}$$

$yQmid(i)$ — коэффициент, отвечающего за различие в энергопотребление суммы компонент от исходного цвета при данном уровне яркости

$yGki(intensity)$ — коэффициенты, отвечающие за различие между энергопотреблением с полной интенсивностью цвета — 255 и её части (При этом выбор $yGki[br[i]]$ происходит в зависимости от уровня яркости, выбирая наиболее подходящий по яркости $yGki$)

Значения $br[i] = 0, 42, 84, 126, 168, 210, 255$ соответственно
 $ur(i), ug(i), ubl(i), ub(i)$ — аппроксимирующие функции, которые задают энергопотребление в зависимости от яркости при максимальной интенсивности своего цвета соответственно

$rgb[0], rgb[1], rgb[2]$ - RGB-код красного, зеленого, синего цветов соответственно

i - уровень яркости от 0 до 255

921600 — количество пикселей у экрана Samsung Galaxy A3 (2016)

4.6. Апробация модели энергопотребления экрана смартфона

Были проведены замеры энергопотребления экрана в амперах для $rgb(255, 255, 0), rgb(255, 0, 255), rgb(0, 255, 255), rgb(30, 200, 55), rgb(20, 210, 190)$ цветов при различных уровнях яркости: 0, 42, 84, 126, 168, 210, 255. Так же данные цвета были пропущены через модель энергопотребления.

Результаты для яркости 0:

Цвет	Модель	Замеры
$rgb(255, 255, 0)$	0.0664	0.0697
$rgb(255, 0, 255)$	0.0696	0.0691
$rgb(0, 255, 255)$	0.0683	0.0734
$rgb(30, 200, 55)$	0.0623	0.0600
$rgb(20, 210, 190)$	0.0663	0.0650

Результаты для яркости 42:

Цвет	Модель	Замеры
$rgb(255, 255, 0)$	0.0674	0.0698
$rgb(255, 0, 255)$	0.0709	0.0692
$rgb(0, 255, 255)$	0.0695	0.0735
$rgb(30, 200, 55)$	0.0640	0.0600
$rgb(20, 210, 190)$	0.0707	0.0700

Результаты для яркости 84:

Цвет	Модель	Замеры
rgb(255, 255, 0)	0.0686	0.0699
rgb(255, 0, 255)	0.0725	0.0693
rgb(0, 255, 255)	0.0709	0.0737
rgb(30, 200, 55)	0.0668	0.0700
rgb(20, 210, 190)	0.0780	0.0800

Результаты для яркости 126:

Цвет	Модель	Замеры
rgb(255, 255, 0)	0.0699	0.0701
rgb(255, 0, 255)	0.0743	0.0695
rgb(0, 255, 255)	0.0725	0.0738
rgb(30, 200, 55)	0.0714	0.0800
rgb(20, 210, 190)	0.0899	0.1000

Результаты для яркости 168:

Цвет	Модель	Замеры
rgb(255, 255, 0)	0.0713	0.0702
rgb(255, 0, 255)	0.0763	0.0696
rgb(0, 255, 255)	0.0743	0.0740
rgb(30, 200, 55)	0.0790	0.0900
rgb(20, 210, 190)	0.1092	0.1200

Результаты для яркости 210:

Цвет	Модель	Замеры
rgb(255, 255, 0)	0.0730	0.0703
rgb(255, 0, 255)	0.0786	0.0697
rgb(0, 255, 255)	0.0764	0.0742
rgb(30, 200, 55)	0.0914	0.1000
rgb(20, 210, 190)	0.1406	0.1450

Результаты для яркости 255:

Цвет	Модель	Замеры
rgb(255, 255, 0)	0.0751	0.0705
rgb(255, 0, 255)	0.0815	0.0699
rgb(0, 255, 255)	0.0789	0.0744
rgb(30, 200, 55)	0.1137	0.1100
rgb(20, 210, 190)	0.1967	0.1700

Можно видеть из результатов замеров, что ни одна измеряемая величина не отошла значительно больше погрешности измерения прибора от величины, которую показывает модель энергопотребления.

Был произведен расчет средней ошибки для приближаемых значений, а именно, было найдено относительное среднее отклонение между фактическим и расчетными значениями.

$\Delta = \frac{\sum \frac{|y_t - y_{model}(x)|}{y_t}}{n}$; $\Delta = 0.028$, что говорит о довольно низкой погрешности, если смотреть на оценку в целом, а не по отдельности.

4.7. Интеграция модели энергопотребления экрана в Navitas Framework

Во время профилирования устройства в NaviProf делается скриншот экрана, который сохраняется в память тестируемого устройства. Затем скриншот отправляется на компьютер. После в Navitas-Plugin скриншот разбирается по-пиксельно и прогоняется через модель энергопотребления экрана, тем самым суммируя энергопотребление пикселей, получая в конечном итоге энергопотребление всего экрана.

5. Заключение

В результате работы над учебной практикой в течение осеннего и весеннего семестра были выполнены следующие задачи.

- Выполнен обзор разных типов экранов с точки зрения их энергопотребления и зависимости энергопотребления от отображаемой ими картинки.
- Сделано Android-приложение [15], которое позволяет проводить тестирование энергопотребления экрана смартфона при различных отображаемых цветах.
- Проведены замеры энергопотребления при различных отображаемых цветах экрана и уровнях яркости на тестовом смартфоне с AMOLED-матрицей.
- На основе полученных данных разработана модель энергопотребления экрана смартфона и встроена в Navitas Framework.
- Проведена апробация указанной модели энергопотребления экрана смартфона.

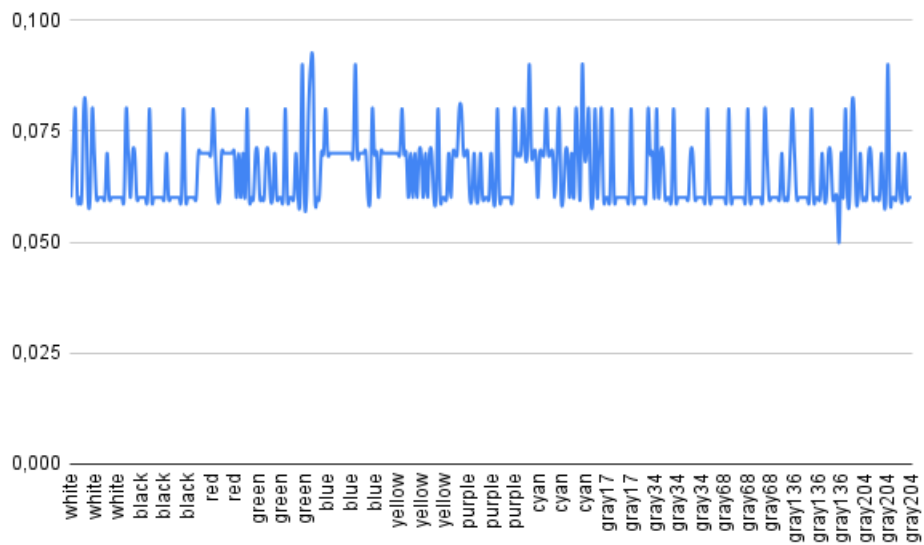


Рис. 5: Данные указаны в амперах для яркости 0 для белого, черного, красного, зеленого, синего, $\text{rgb}(255, 255, 0)$, $\text{rgb}(255, 0, 255)$, $\text{rgb}(0, 255, 255)$, $\text{rgb}(17, 17, 17)$, $\text{rgb}(34, 34, 34)$, $\text{rgb}(68, 68, 68)$, $\text{rgb}(136, 136, 136)$, $\text{rgb}(204, 204, 204)$ цветов соответственно

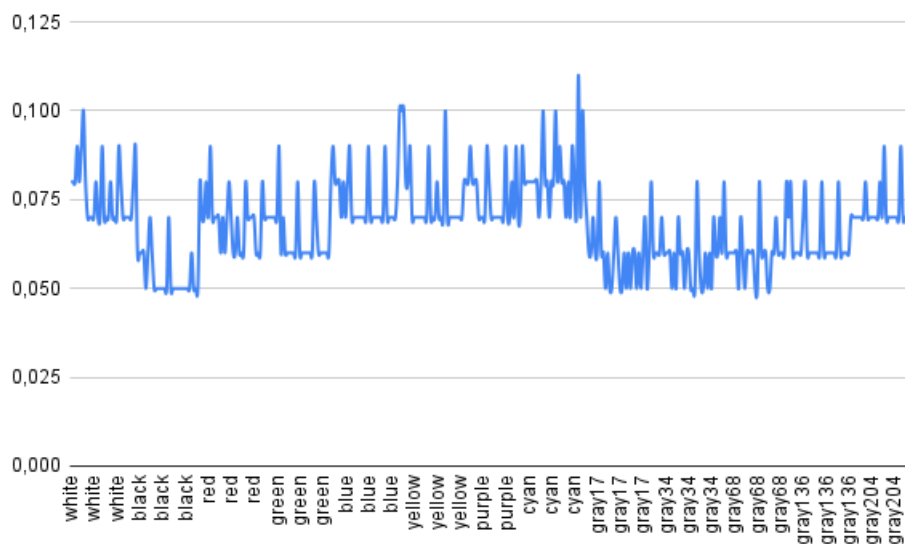


Рис. 6: Данные указаны в амперах для яркости 42 для белого, черного, красного, зеленого, синего, $\text{rgb}(255, 255, 0)$, $\text{rgb}(255, 0, 255)$, $\text{rgb}(0, 255, 255)$, $\text{rgb}(17, 17, 17)$, $\text{rgb}(34, 34, 34)$, $\text{rgb}(68, 68, 68)$, $\text{rgb}(136, 136, 136)$, $\text{rgb}(204, 204, 204)$ цветов соответственно

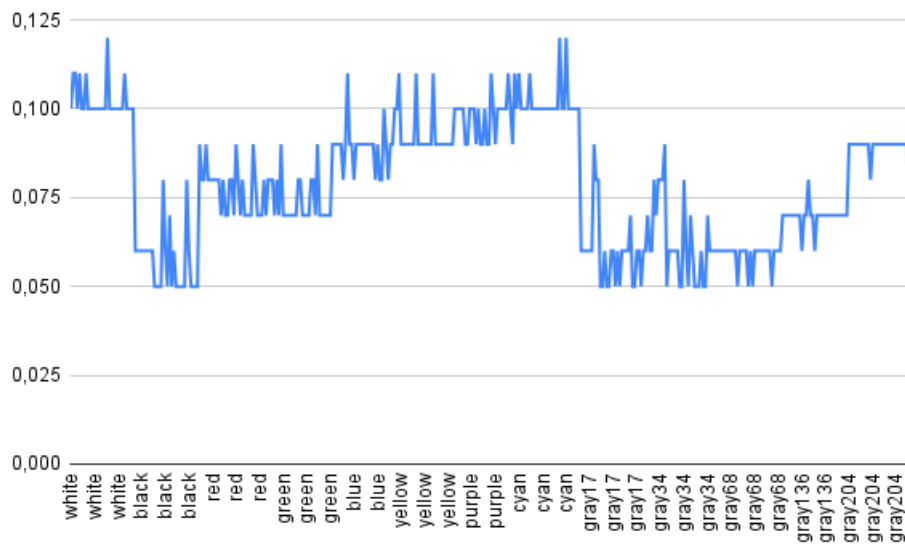


Рис. 7: Данные указаны в амперах для яркости 84 для белого, черного, красного, зеленого, синего, rgb(255, 255, 0), rgb(255, 0, 255), rgb(0, 255, 255), rgb(17, 17, 17), rgb(34, 34, 34), rgb(68, 68, 68), rgb(136, 136, 136), rgb(204, 204, 204) цветов соответственно

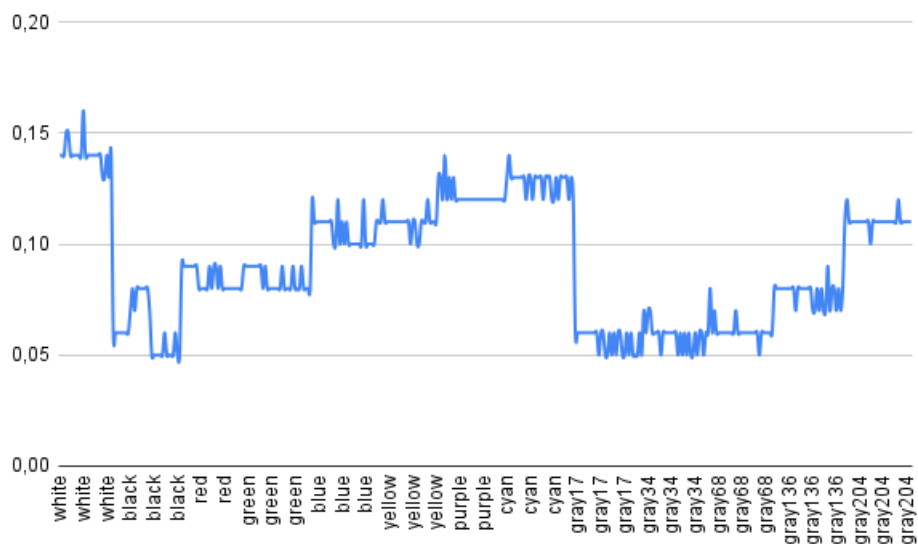


Рис. 8: Данные указаны в амперах для яркости 126 для белого, черного, красного, зеленого, синего, rgb(255, 255, 0), rgb(255, 0, 255), rgb(0, 255, 255), rgb(17, 17, 17), rgb(34, 34, 34), rgb(68, 68, 68), rgb(136, 136, 136), rgb(204, 204, 204) цветов соответственно

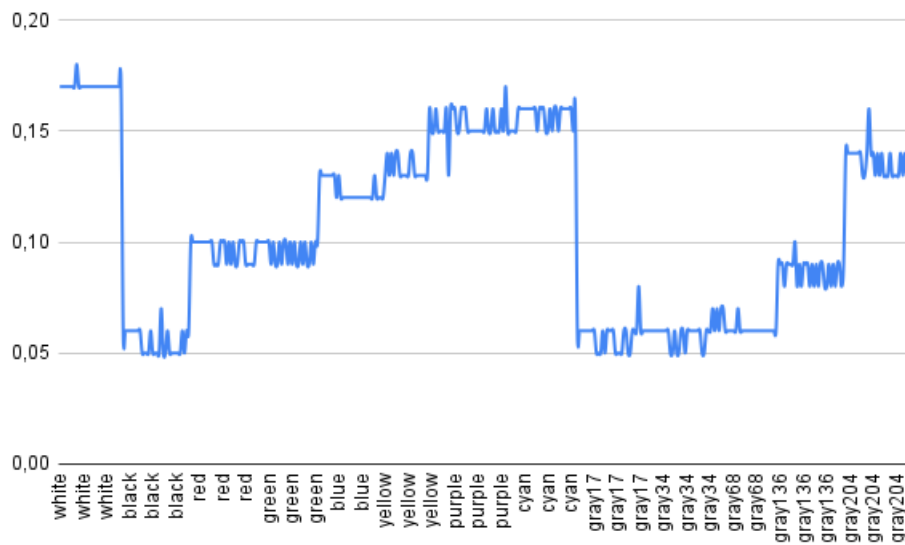


Рис. 9: Данные указаны в амперах для яркости 168 для белого, черного, красного, зеленого, синего, $\text{rgb}(255, 255, 0)$, $\text{rgb}(255, 0, 255)$, $\text{rgb}(0, 255, 255)$, $\text{rgb}(17, 17, 17)$, $\text{rgb}(34, 34, 34)$, $\text{rgb}(68, 68, 68)$, $\text{rgb}(136, 136, 136)$, $\text{rgb}(204, 204, 204)$ цветов соответственно

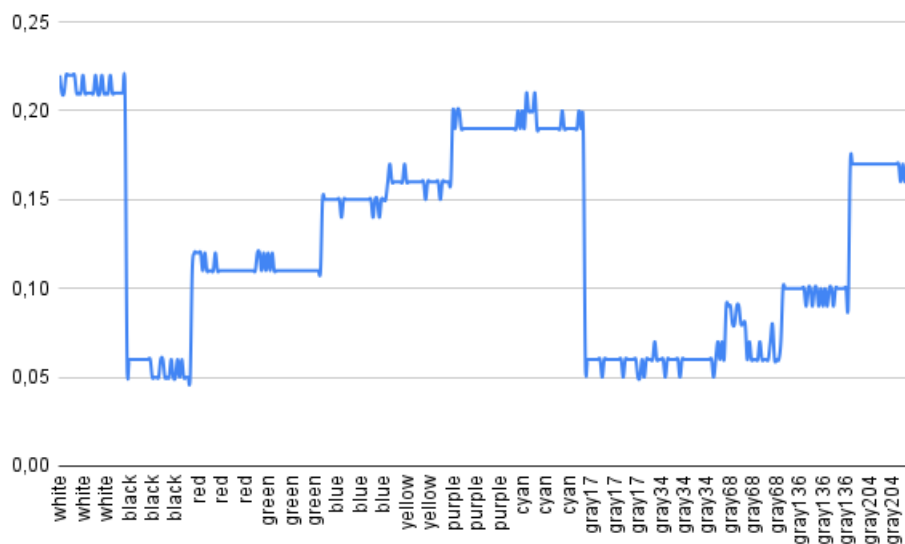


Рис. 10: Данные указаны в амперах для яркости 210 для белого, черного, красного, зеленого, синего, $\text{rgb}(255, 255, 0)$, $\text{rgb}(255, 0, 255)$, $\text{rgb}(0, 255, 255)$, $\text{rgb}(17, 17, 17)$, $\text{rgb}(34, 34, 34)$, $\text{rgb}(68, 68, 68)$, $\text{rgb}(136, 136, 136)$, $\text{rgb}(204, 204, 204)$ цветов соответственно

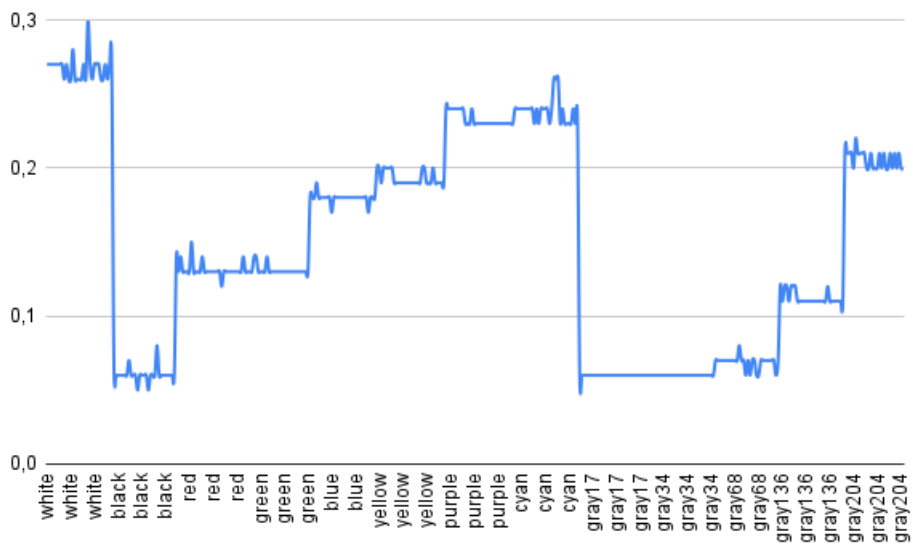


Рис. 11: Данные указаны в амперах для яркости 255 для белого, черного, красного, зеленого, синего, $\text{rgb}(255, 255, 0)$, $\text{rgb}(255, 0, 255)$, $\text{rgb}(0, 255, 255)$, $\text{rgb}(17, 17, 17)$, $\text{rgb}(34, 34, 34)$, $\text{rgb}(68, 68, 68)$, $\text{rgb}(136, 136, 136)$, $\text{rgb}(204, 204, 204)$ цветов соответственно

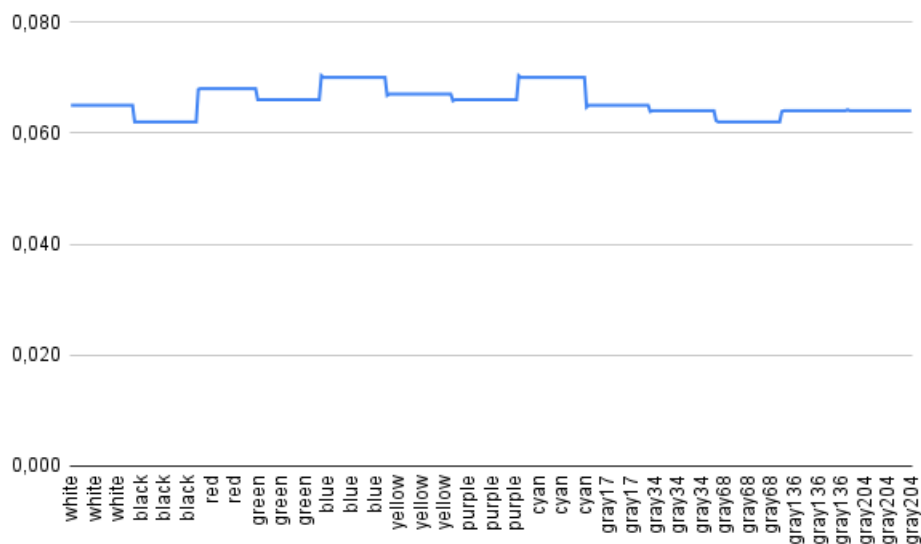


Рис. 12: Указаны средние значения в амперах для яркости 0 для белого, черного, красного, зеленого, синего, $\text{rgb}(255, 255, 0)$, $\text{rgb}(255, 0, 255)$, $\text{rgb}(0, 255, 255)$, $\text{rgb}(17, 17, 17)$, $\text{rgb}(34, 34, 34)$, $\text{rgb}(68, 68, 68)$, $\text{rgb}(136, 136, 136)$, $\text{rgb}(204, 204, 204)$ цветов соответственно

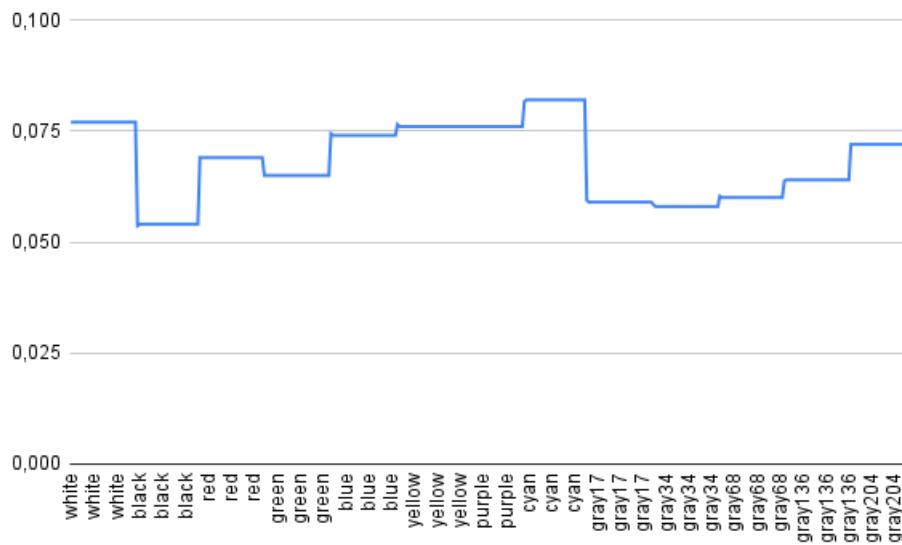


Рис. 13: Указаны средние значения в амперах для яркости 42 для белого, черного, красного, зеленого, синего, $\text{rgb}(255, 255, 0)$, $\text{rgb}(255, 0, 255)$, $\text{rgb}(0, 255, 255)$, $\text{rgb}(17, 17, 17)$, $\text{rgb}(34, 34, 34)$, $\text{rgb}(68, 68, 68)$, $\text{rgb}(136, 136, 136)$, $\text{rgb}(204, 204, 204)$ цветов соответственно

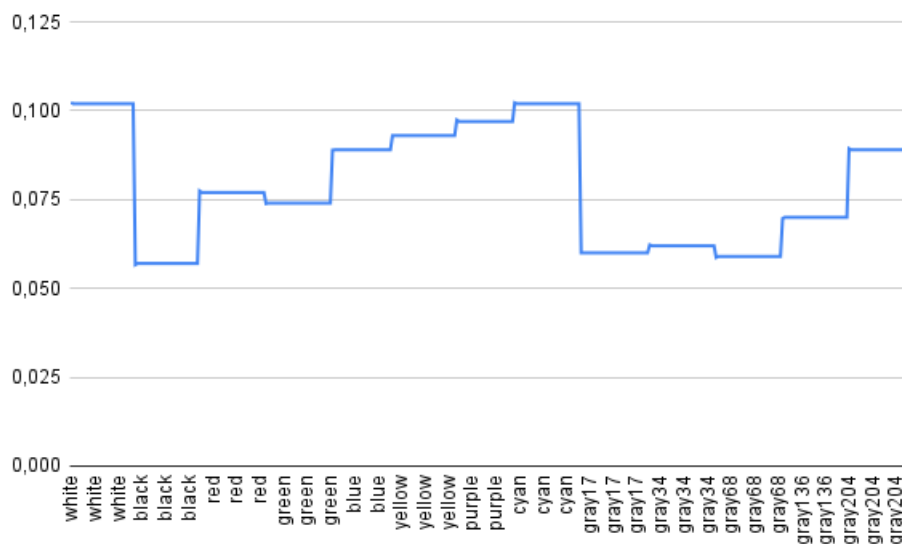


Рис. 14: Указаны средние значения в амперах для яркости 84 для белого, черного, красного, зеленого, синего, $\text{rgb}(255, 255, 0)$, $\text{rgb}(255, 0, 255)$, $\text{rgb}(0, 255, 255)$, $\text{rgb}(17, 17, 17)$, $\text{rgb}(34, 34, 34)$, $\text{rgb}(68, 68, 68)$, $\text{rgb}(136, 136, 136)$, $\text{rgb}(204, 204, 204)$ цветов соответственно

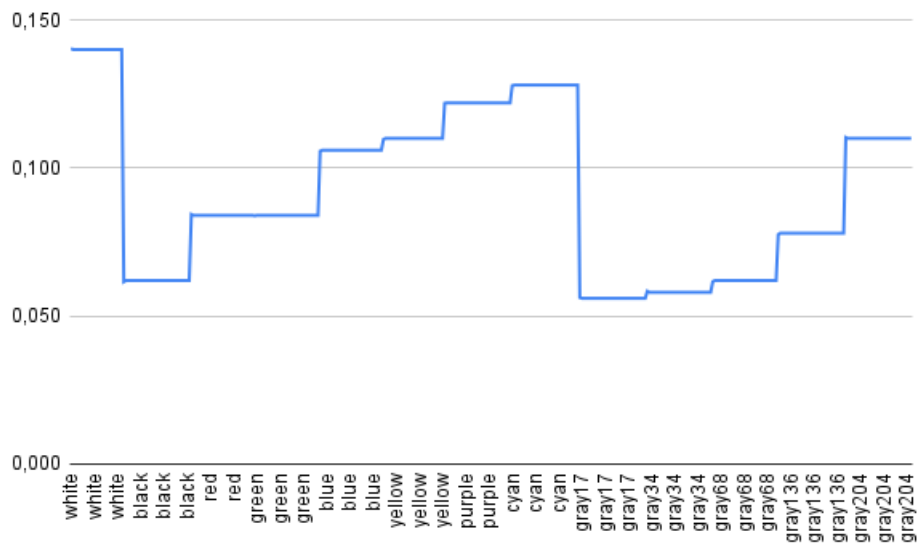


Рис. 15: Указаны средние значения в амперах для яркости 126 для белого, черного, красного, зеленого, синего, $\text{rgb}(255, 255, 0)$, $\text{rgb}(255, 0, 255)$, $\text{rgb}(0, 255, 255)$, $\text{rgb}(17, 17, 17)$, $\text{rgb}(34, 34, 34)$, $\text{rgb}(68, 68, 68)$, $\text{rgb}(136, 136, 136)$, $\text{rgb}(204, 204, 204)$ цветов соответственно

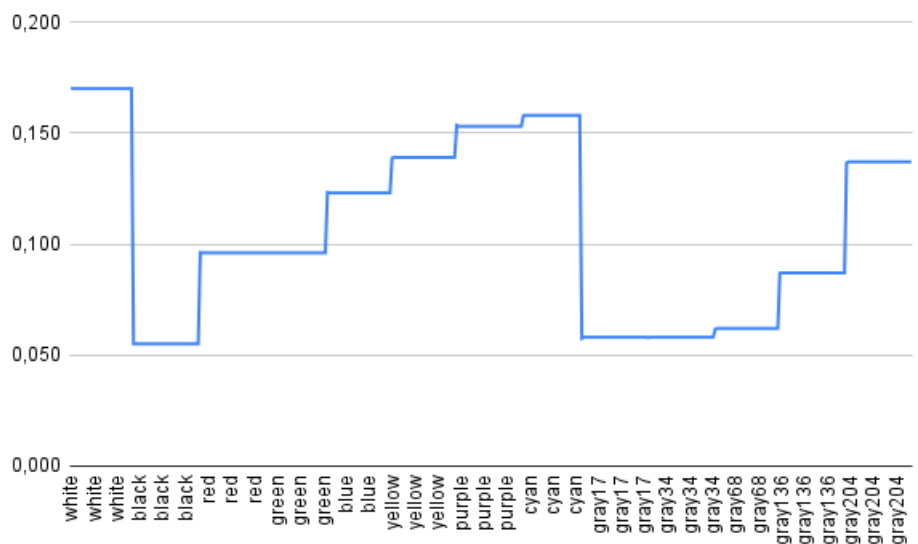


Рис. 16: Указаны средние значения в амперах для яркости 168 для белого, черного, красного, зеленого, синего, $\text{rgb}(255, 255, 0)$, $\text{rgb}(255, 0, 255)$, $\text{rgb}(0, 255, 255)$, $\text{rgb}(17, 17, 17)$, $\text{rgb}(34, 34, 34)$, $\text{rgb}(68, 68, 68)$, $\text{rgb}(136, 136, 136)$, $\text{rgb}(204, 204, 204)$ цветов соответственно

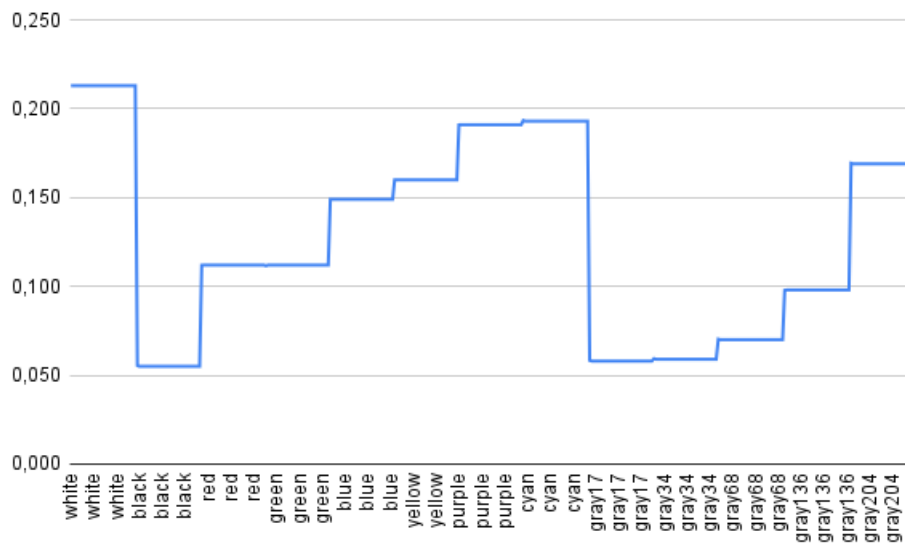


Рис. 17: Указаны средние значения в амперах для яркости 210 для белого, черного, красного, зеленого, синего, $\text{rgb}(255, 255, 0)$, $\text{rgb}(255, 0, 255)$, $\text{rgb}(0, 255, 255)$, $\text{rgb}(17, 17, 17)$, $\text{rgb}(34, 34, 34)$, $\text{rgb}(68, 68, 68)$, $\text{rgb}(136, 136, 136)$, $\text{rgb}(204, 204, 204)$ цветов соответственно

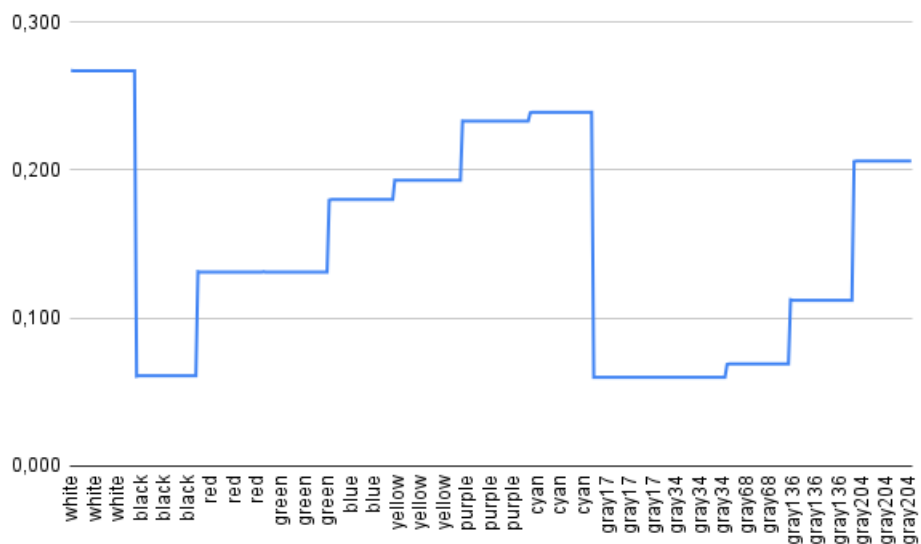


Рис. 18: Указаны средние значения в амперах для яркости 255 для белого, черного, красного, зеленого, синего, $\text{rgb}(255, 255, 0)$, $\text{rgb}(255, 0, 255)$, $\text{rgb}(0, 255, 255)$, $\text{rgb}(17, 17, 17)$, $\text{rgb}(34, 34, 34)$, $\text{rgb}(68, 68, 68)$, $\text{rgb}(136, 136, 136)$, $\text{rgb}(204, 204, 204)$ цветов соответственно

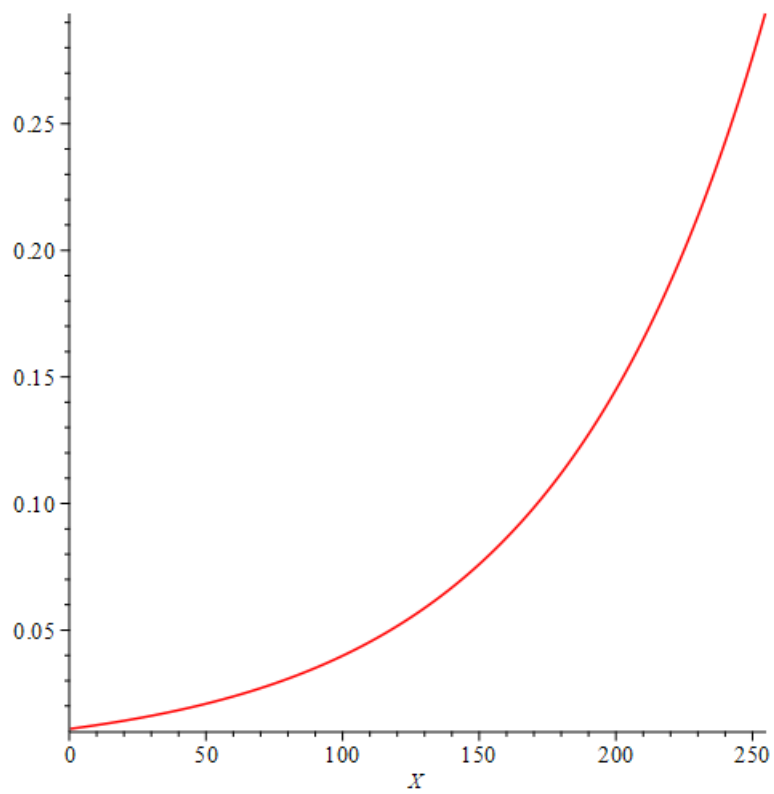


Рис. 19: График энергопотребления белого цвета, $uw(x)$

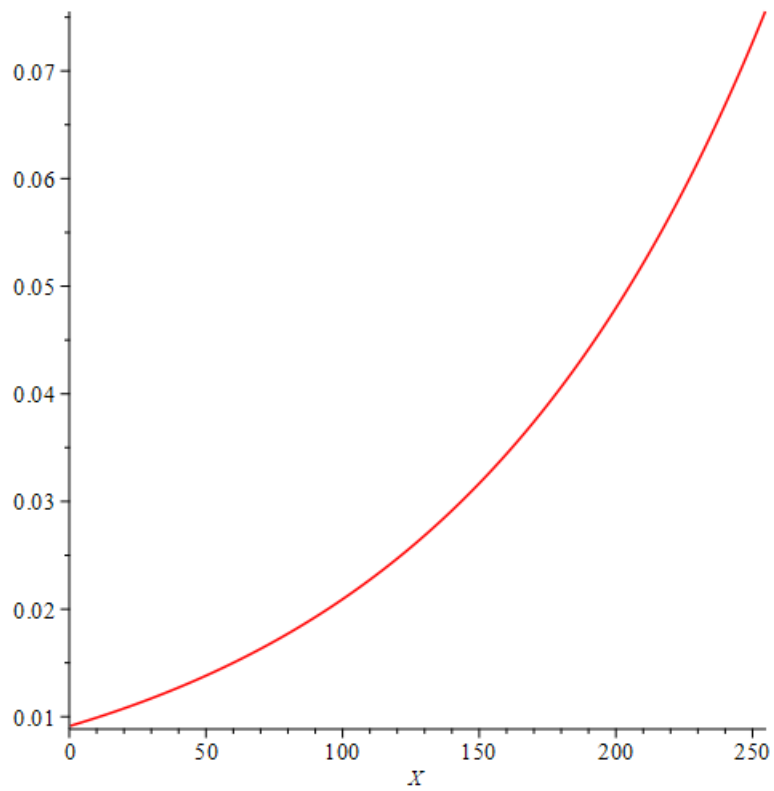


Рис. 20: График энергопотребления красного цвета, $ur(x)$

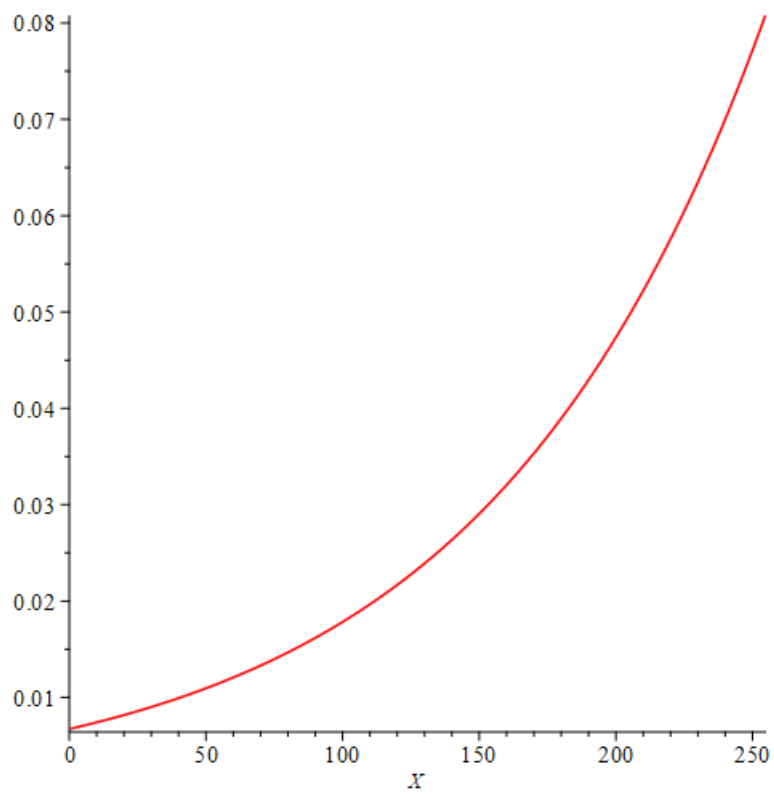


Рис. 21: График энергопотребления зеленого цвета, $u_g(x)$

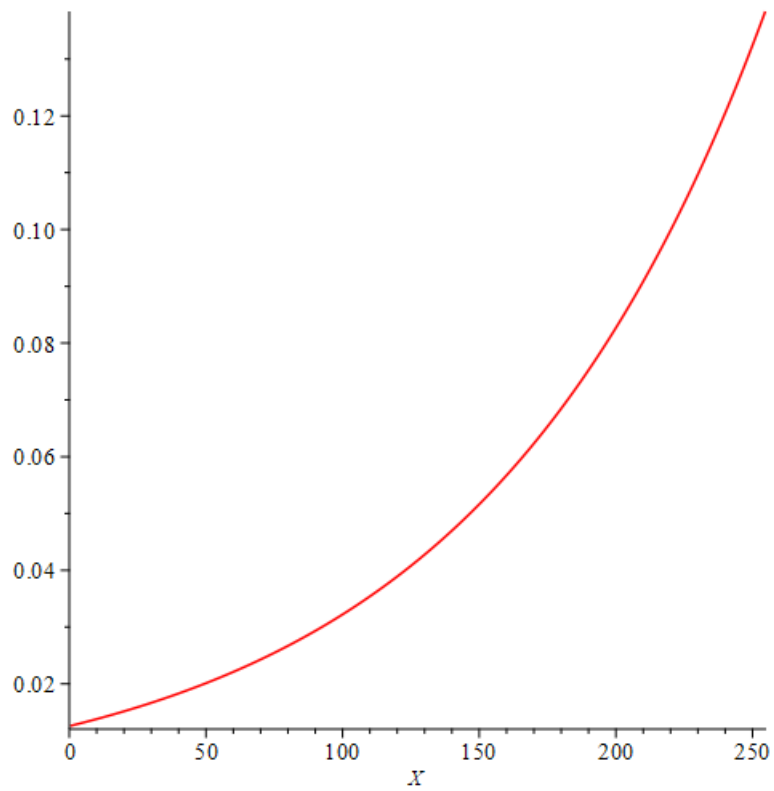


Рис. 22: График энергопотребления синего цвета, $u_{bl}(x)$

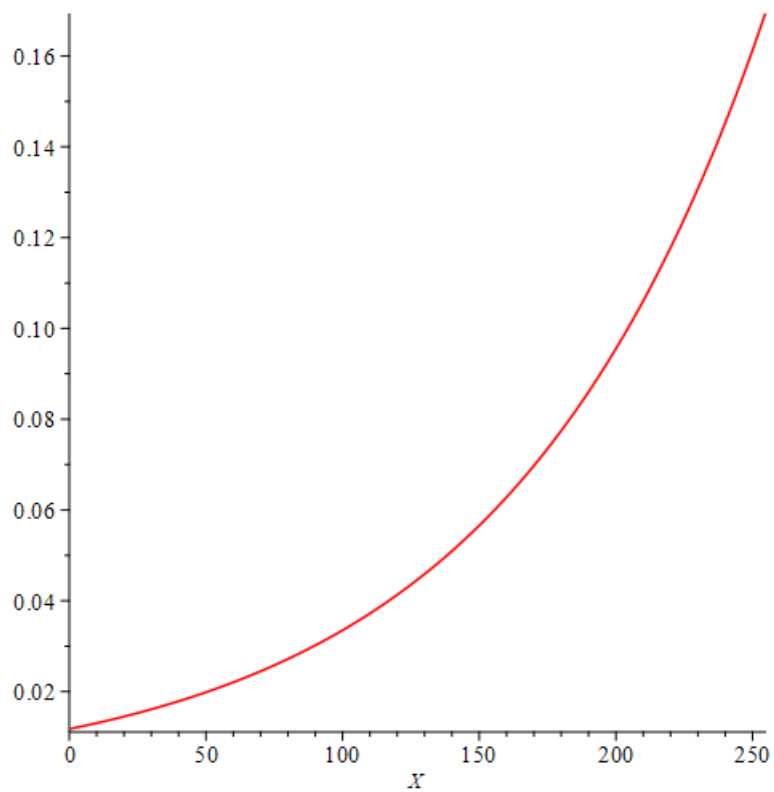


Рис. 23: График энергопотребления $\text{rgb}(255, 255, 0)$ цвета, $u_y(x)$

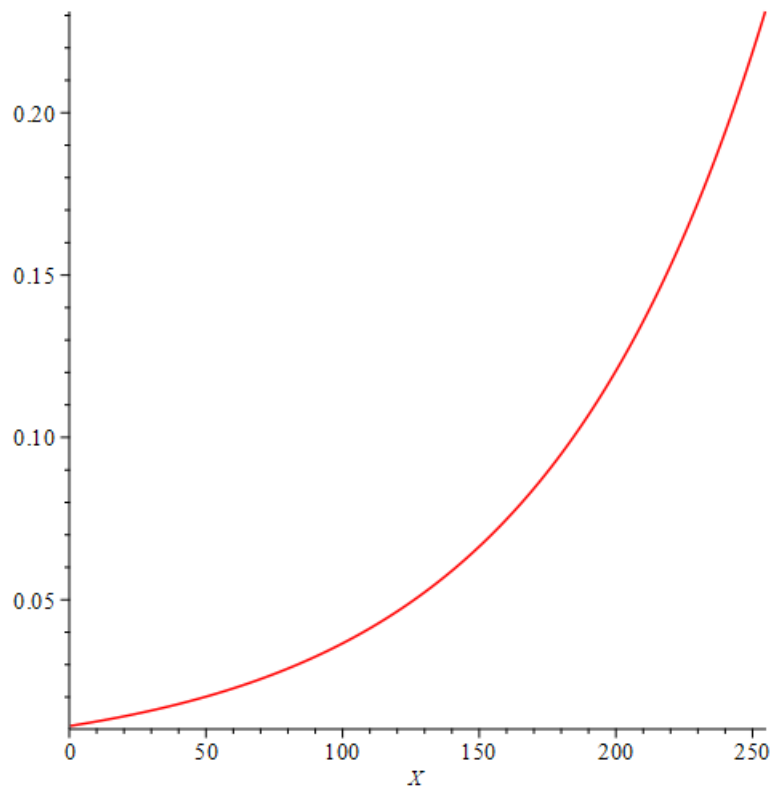


Рис. 24: График энергопотребления $\text{rgb}(255, 0, 255)$ цвета, $u_r(x)$

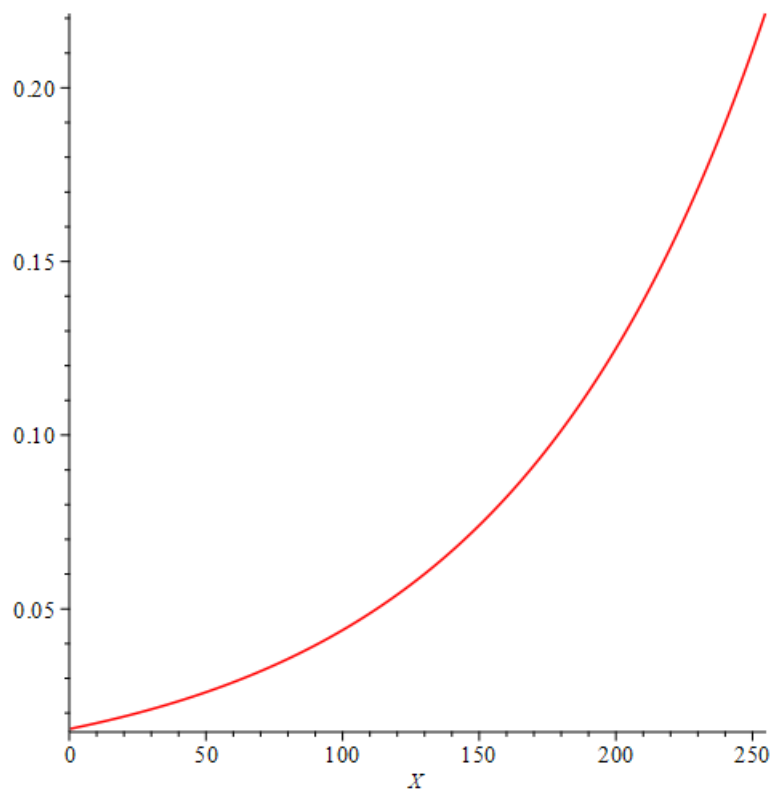


Рис. 25: График энергопотребления $\text{rgb}(0, 255, 255)$ цвета, $u_c(x)$

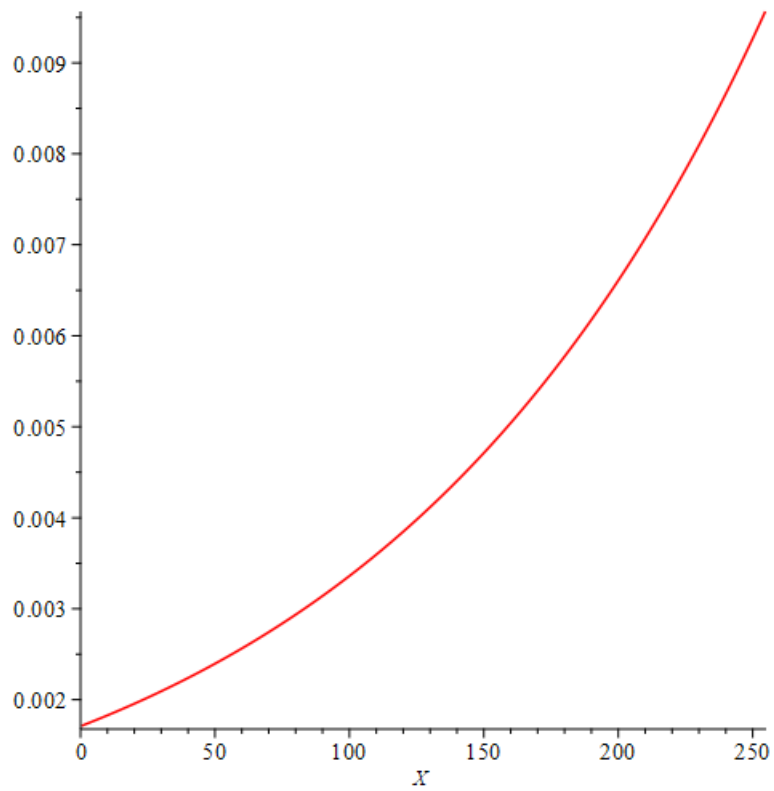


Рис. 26: График энергопотребления $\text{rgb}(68, 68, 68)$ цвета, $u_{g68}(x)$

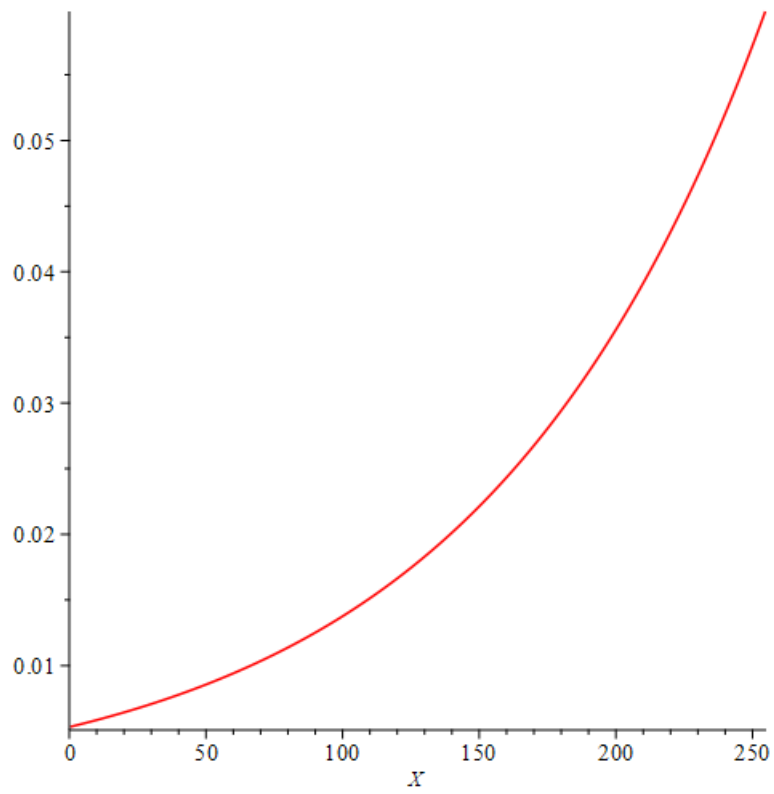


Рис. 27: График энергопотребления $\text{rgb}(136, 136, 136)$ цвета, $\text{ug}136(x)$

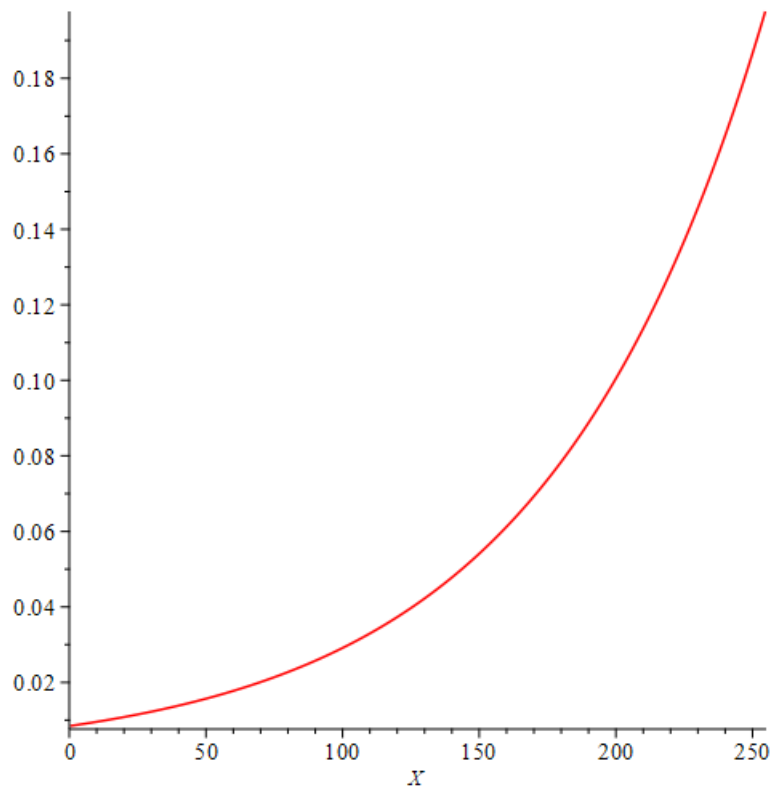


Рис. 28: График энергопотребления $\text{rgb}(204, 204, 204)$ цвета, $\text{ug}204(x)$

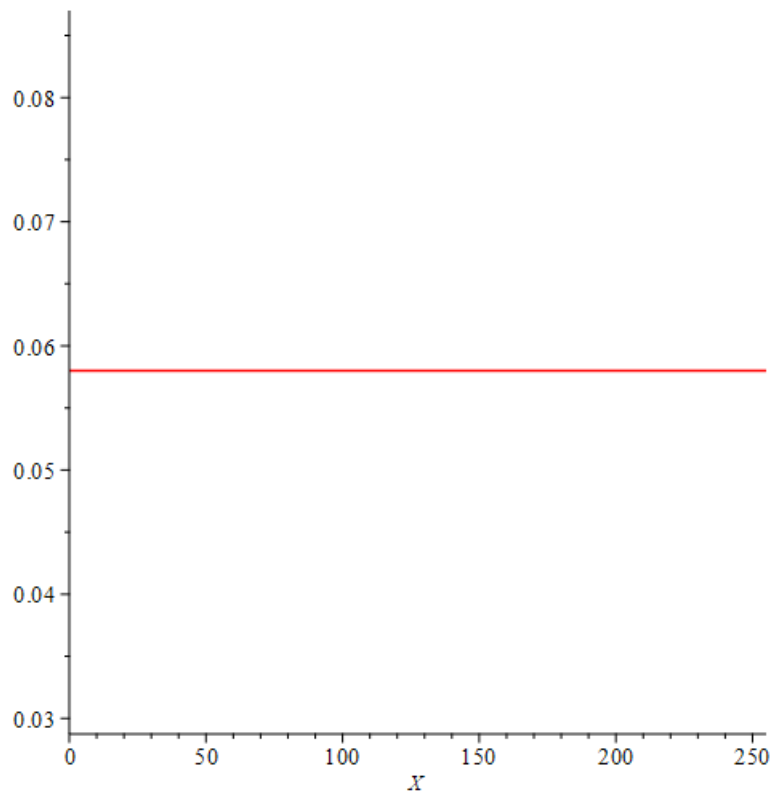


Рис. 29: Графики энергопотребления черного цвета, $y_b(x)$

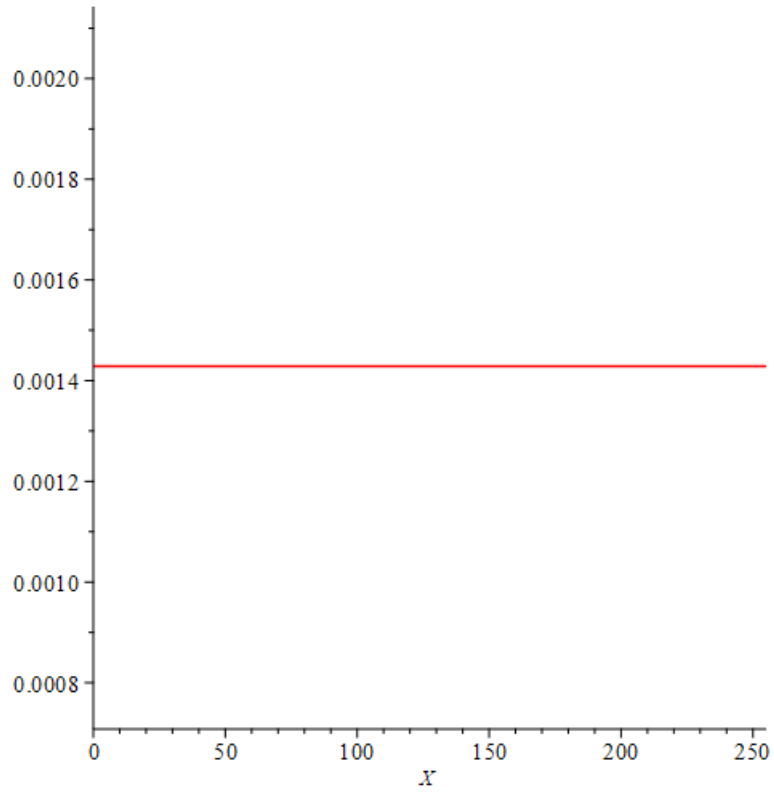


Рис. 30: Графики энергопотребления $\text{rgb}(17, 17, 17)$ цвета, $y_{g17}(x)$

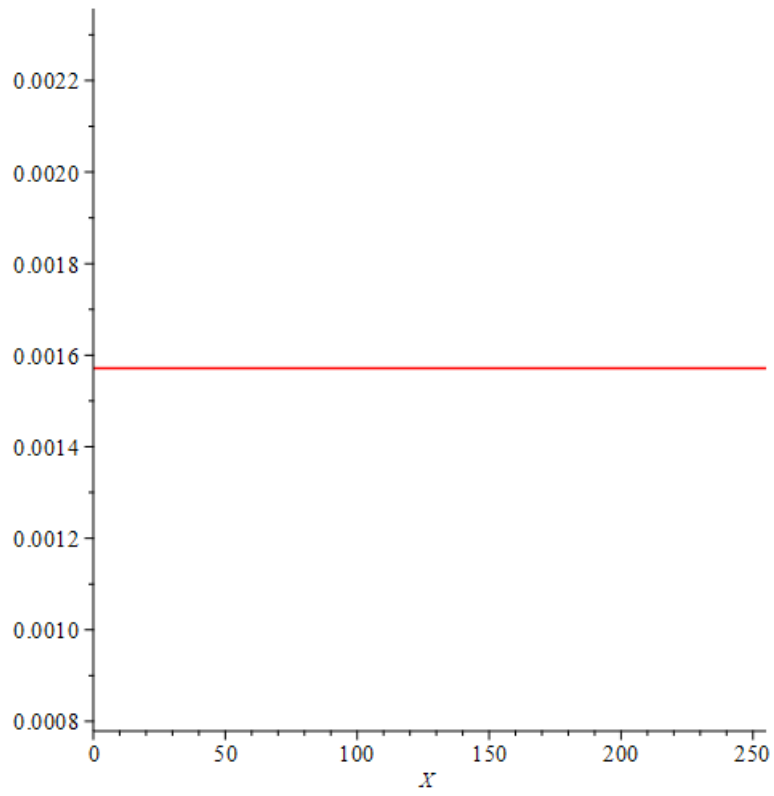


Рис. 31: Графики энергопотребления rgb(34, 34, 34) цвета, $yg_{34}(x)$

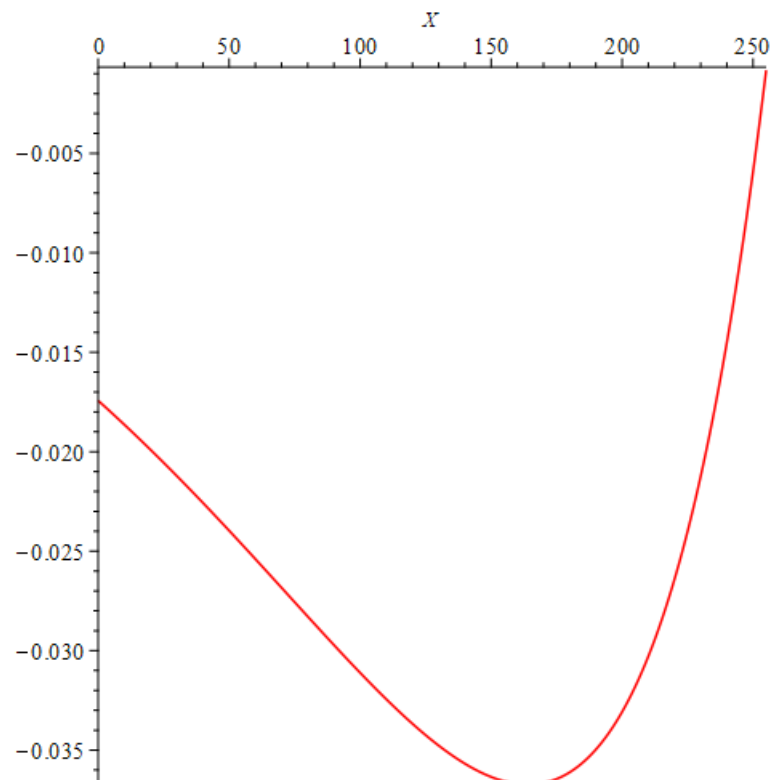


Рис. 32: Разность энергопотребления белого и суммы его компонент, $ydifW(x)$

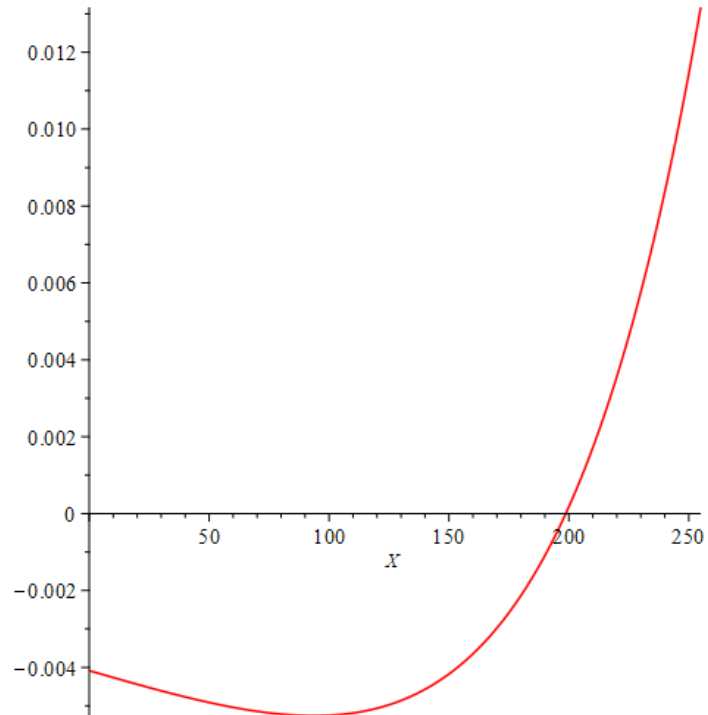


Рис. 33: Разность энергопотребления $\text{rgb}(255, 255, 0)$ цвета и суммы его компонент, $y_{\text{diffY}}(x)$

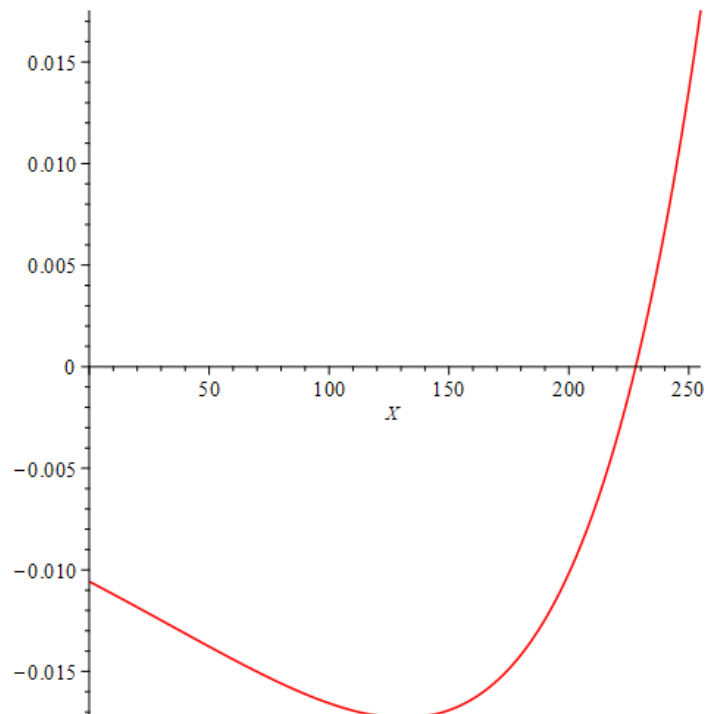


Рис. 34: Разность энергопотребления $\text{rgb}(255, 0, 255)$ цвета и суммы его компонент, $y_{\text{diffP}}(x)$

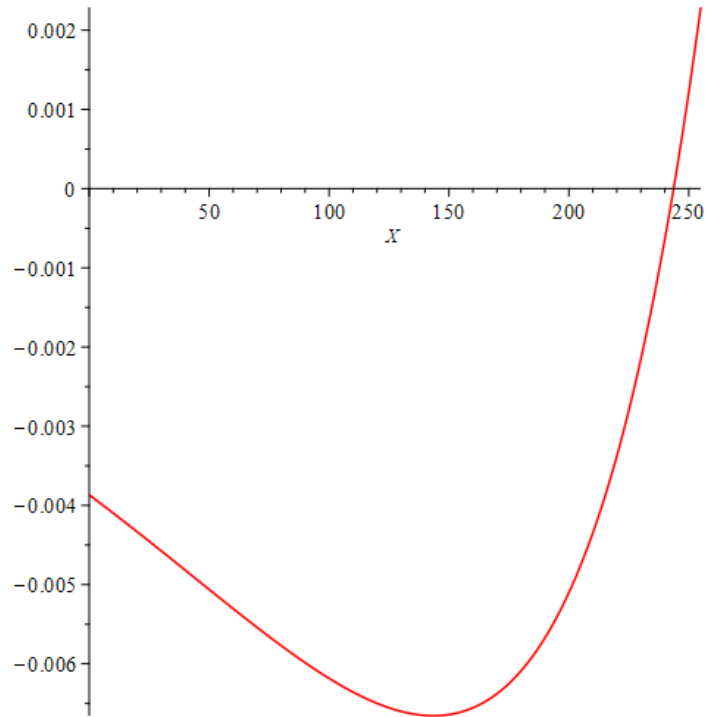


Рис. 35: Разность энергопотребления $\text{rgb}(0, 255, 255)$ цвета и суммы его компонент, $y_{\text{diffC}}(x)$

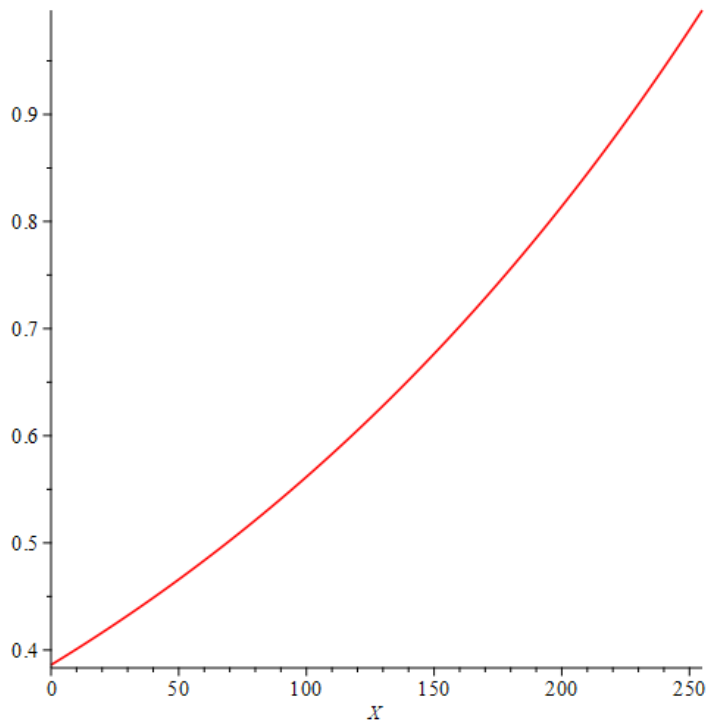


Рис. 36: Коэффициент отношения энергопотребления белого и суммы его компонент, $y_{\text{QW}}(x)$

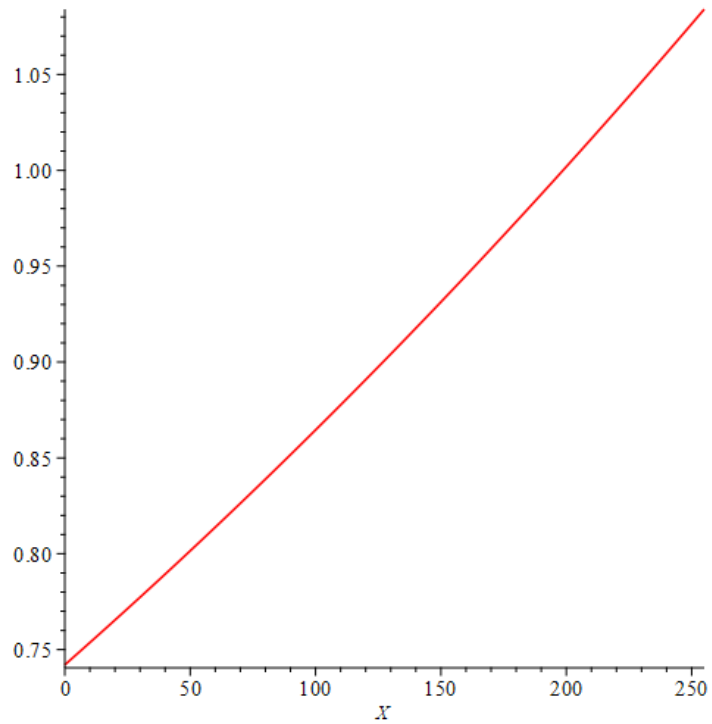


Рис. 37: Коэффициент отношения энергопотребления $\text{rgb}(255, 255, 0)$ цвета и суммы его компонент, $y_{QY}(x)$

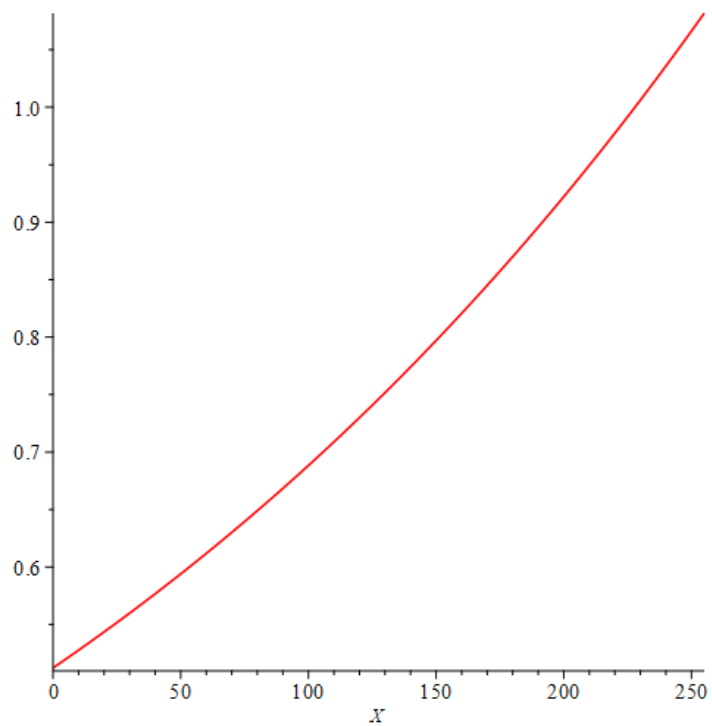


Рис. 38: Коэффициент отношения энергопотребления $\text{rgb}(255, 0, 255)$ цвета и суммы его компонент, $y_{QP}(x)$

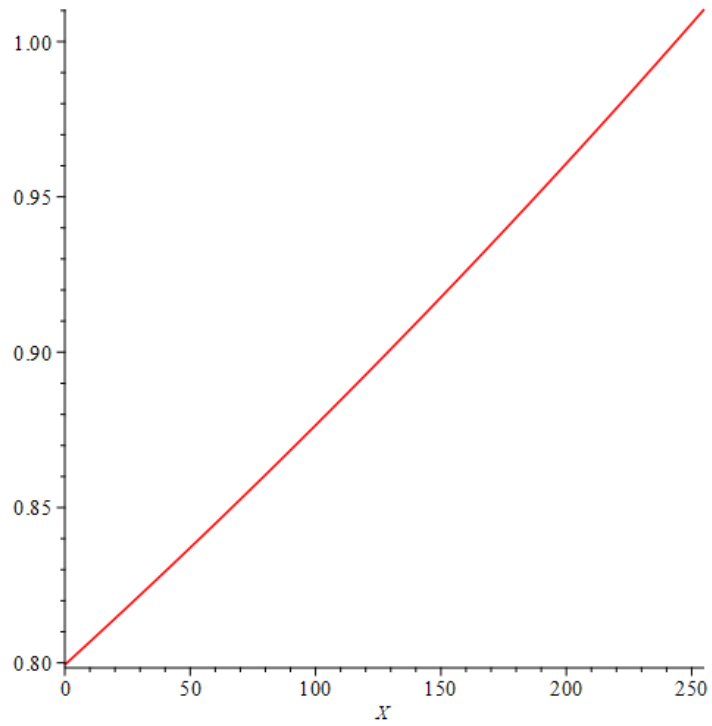


Рис. 39: Коэффициент отношения энергопотребления $\text{rgb}(0, 255, 255)$ цвета и суммы его компонент, $y_{QC}(x)$

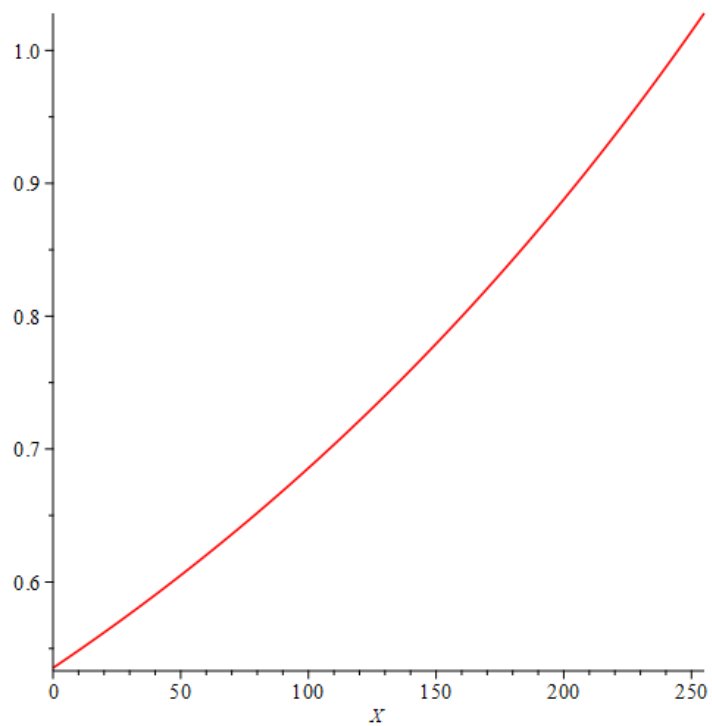


Рис. 40: Средний коэффициент отношения энергопотребления цвета и суммы его компонент, $y_{Qmid}(x)$

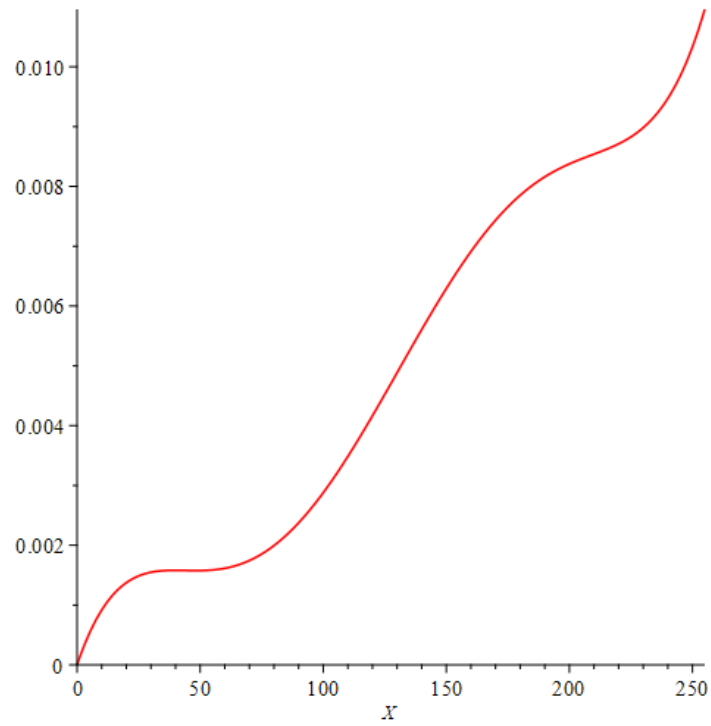


Рис. 41: Интерполяционный многочлен y_{Gk0} , зависящий от интенсивности серого цвета для яркости 0

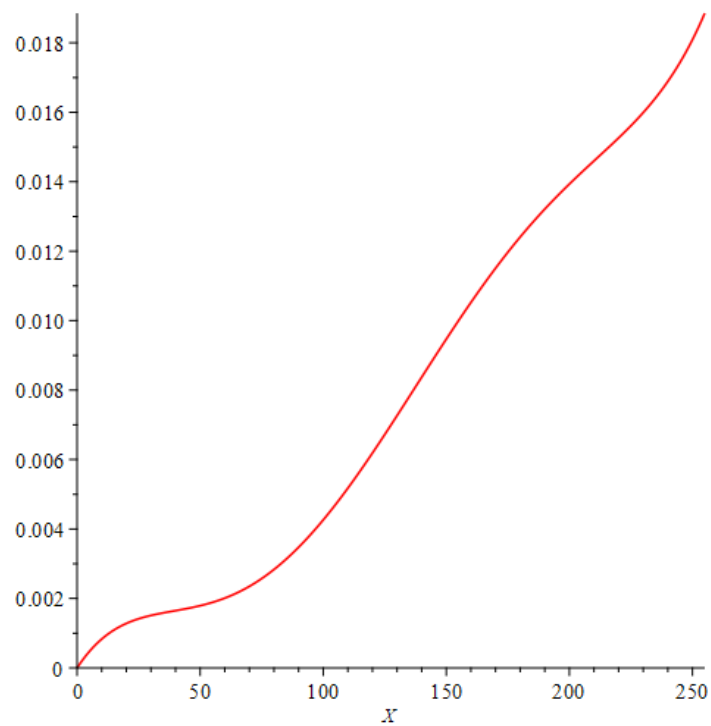


Рис. 42: Интерполяционный многочлен y_{Gk42} , зависящий от интенсивности серого цвета для яркости 42

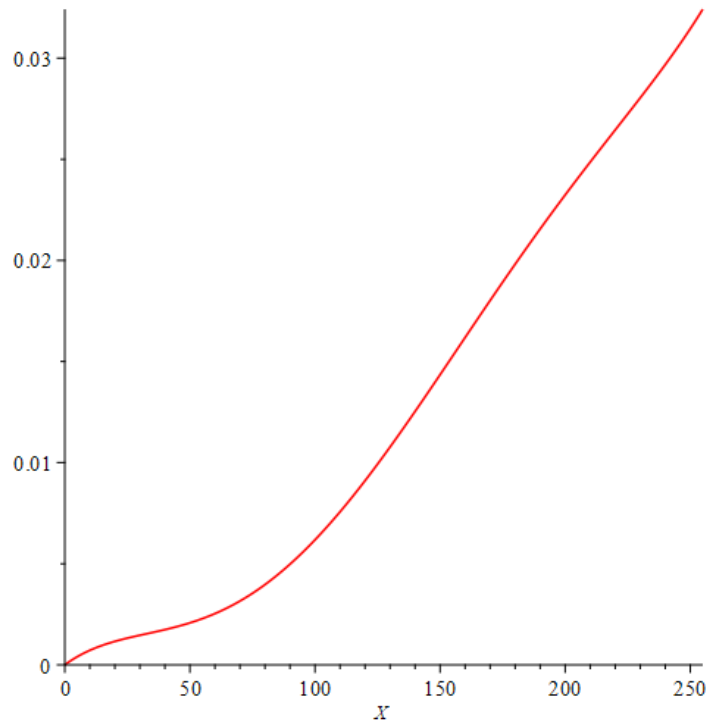


Рис. 43: Интерполяционный многочлен y_{Gk84} , зависящий от интенсивности серого цвета для яркости 84

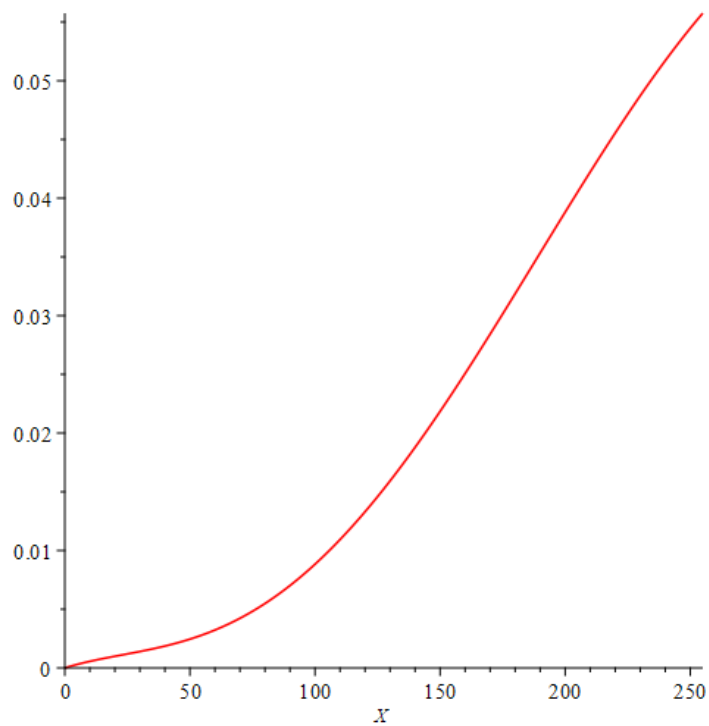


Рис. 44: Интерполяционный многочлен y_{Gk126} , зависящий от интенсивности серого цвета для яркости 126

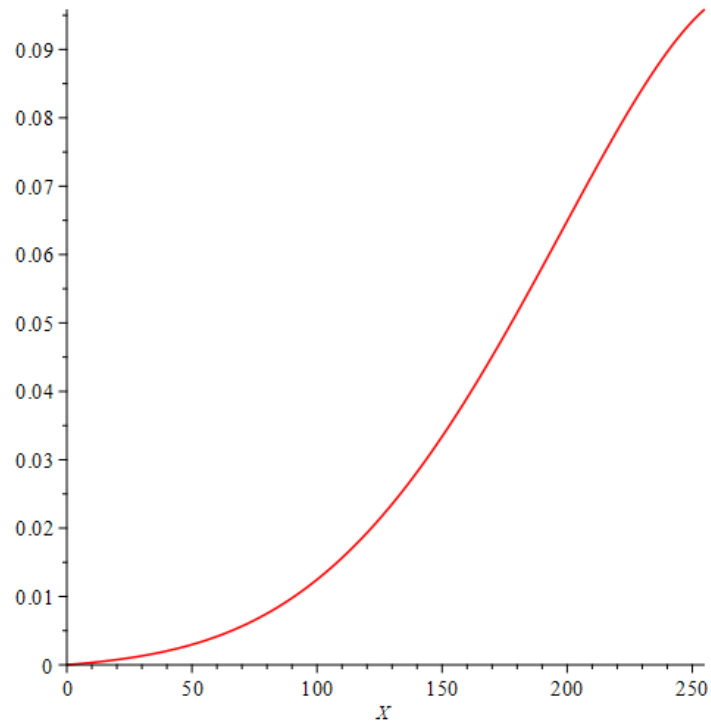


Рис. 45: Интерполяционный многочлен y_{Gk168} , зависящий от интенсивности серого цвета для яркости 168

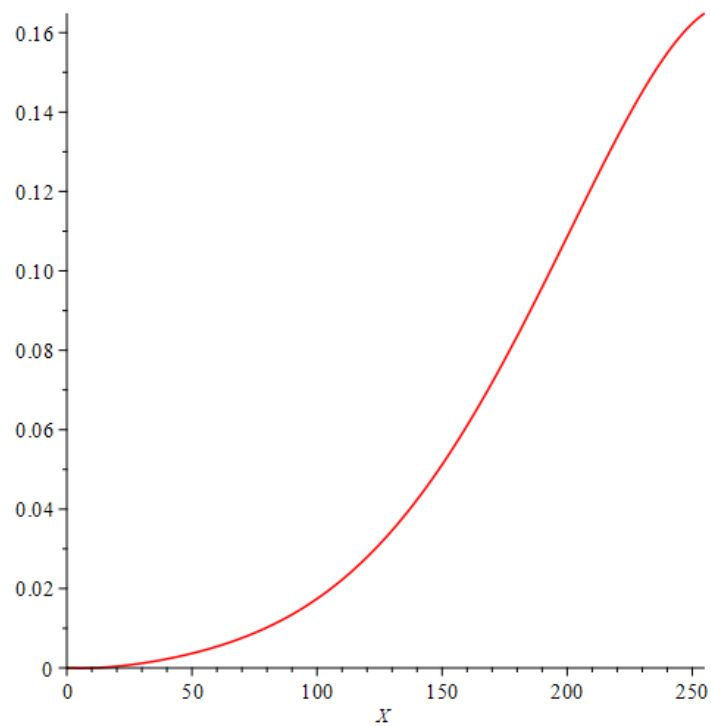


Рис. 46: Интерполяционный многочлен y_{Gk210} , зависящий от интенсивности серого цвета для яркости 210

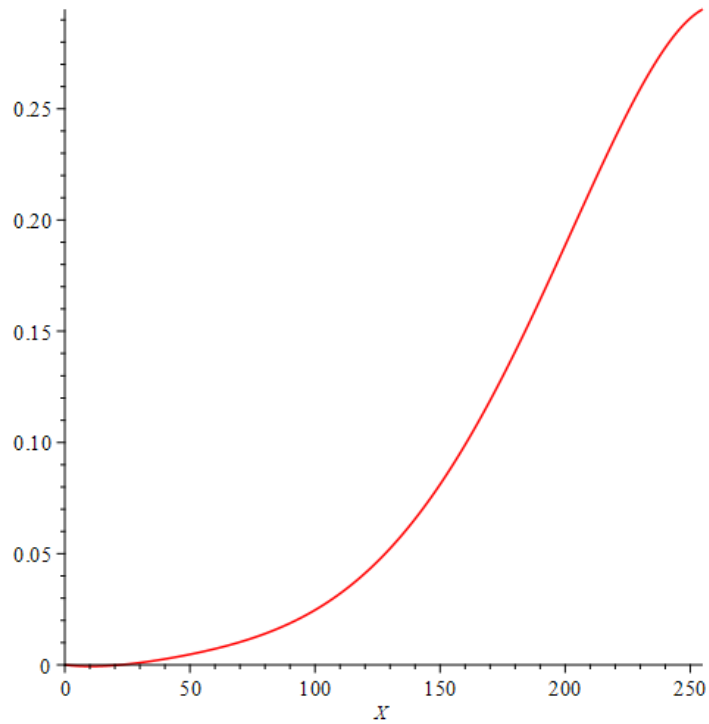


Рис. 47: Интерполяционный многочлен y_{Gk255} , зависящий от интенсивности серого цвета для яркости 255

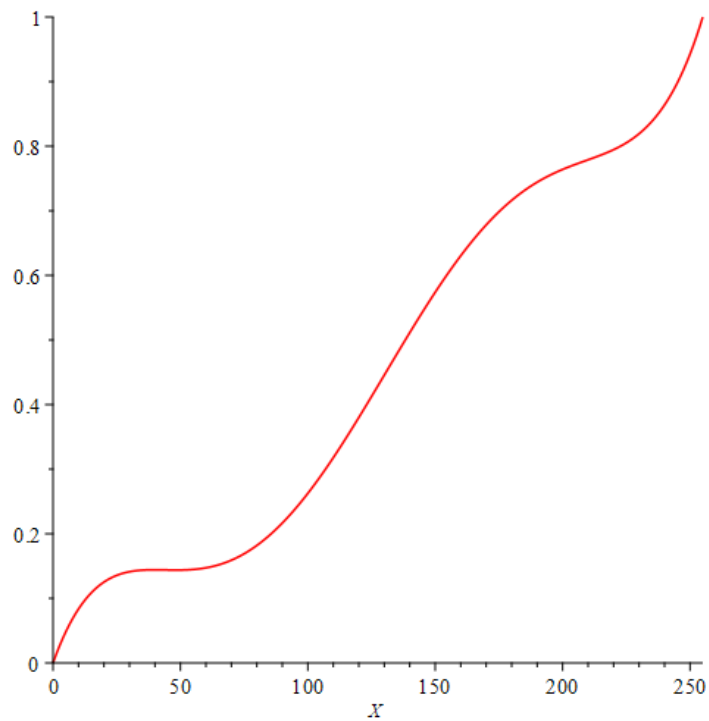


Рис. 48: Коэффициент интерполяционного многочлена y_{Gk0} , являющийся отношением многочлена на его максимум для яркости 0, y_{Gki0}

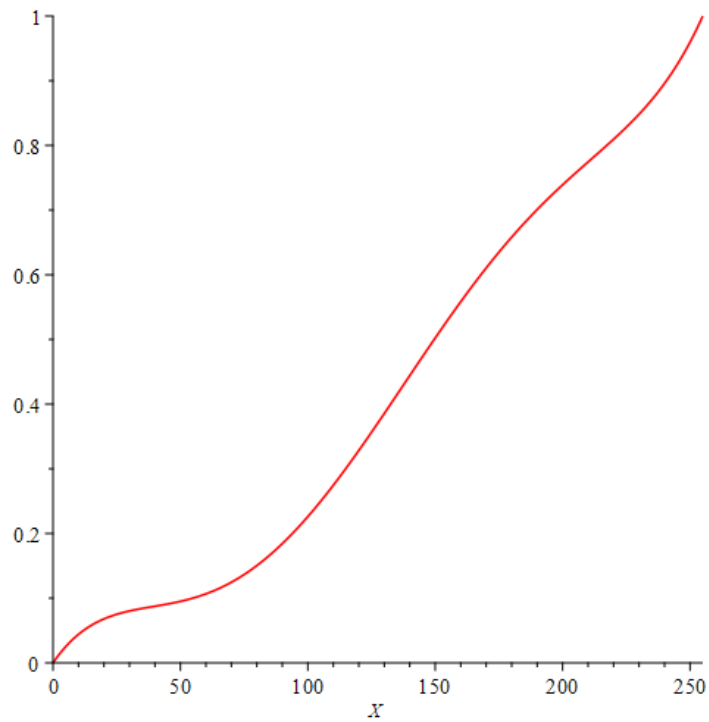


Рис. 49: Коэффициент интерполяционного многочлена y_{Gk42} , являющийся отношением многочлена на его максимум для яркости 42, y_{Gki42}

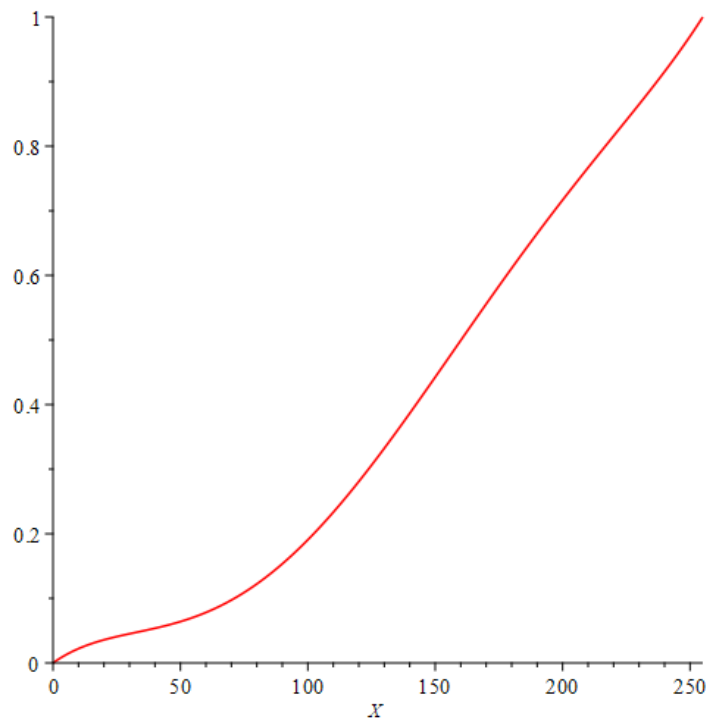


Рис. 50: Коэффициент интерполяционного многочлена y_{Gk84} , являющийся отношением многочлена на его максимум для яркости 84, y_{Gki84}

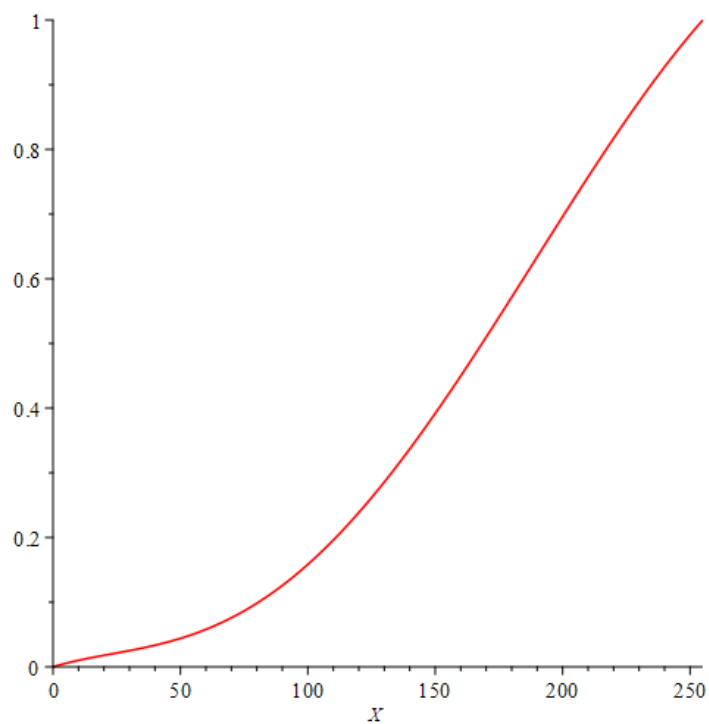


Рис. 51: Коэффициент интерполяционного многочлена y_{Gk126} , являющийся отношением многочлена на его максимум для яркости 126, y_{Gki126}

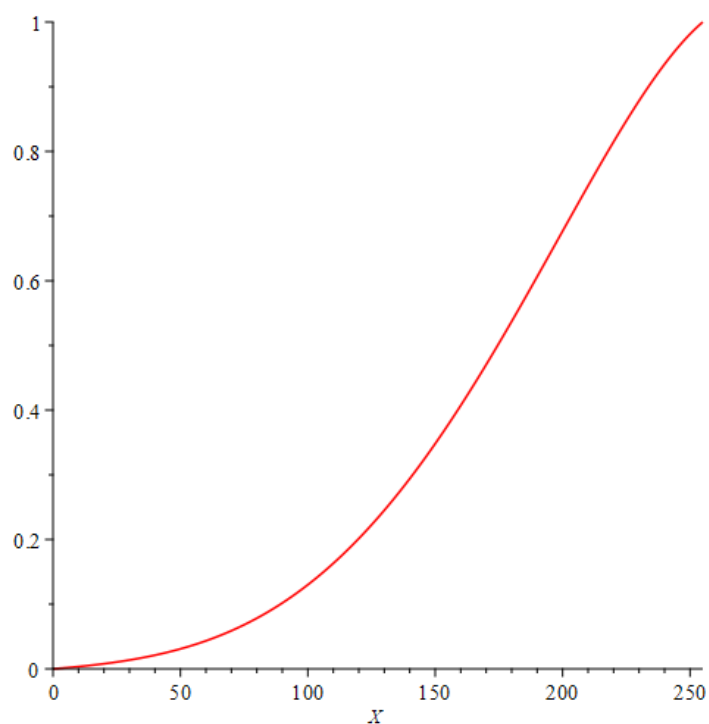


Рис. 52: Коэффициент интерполяционного многочлена y_{Gk168} , являющийся отношением многочлена на его максимум для яркости 168, y_{Gki168}

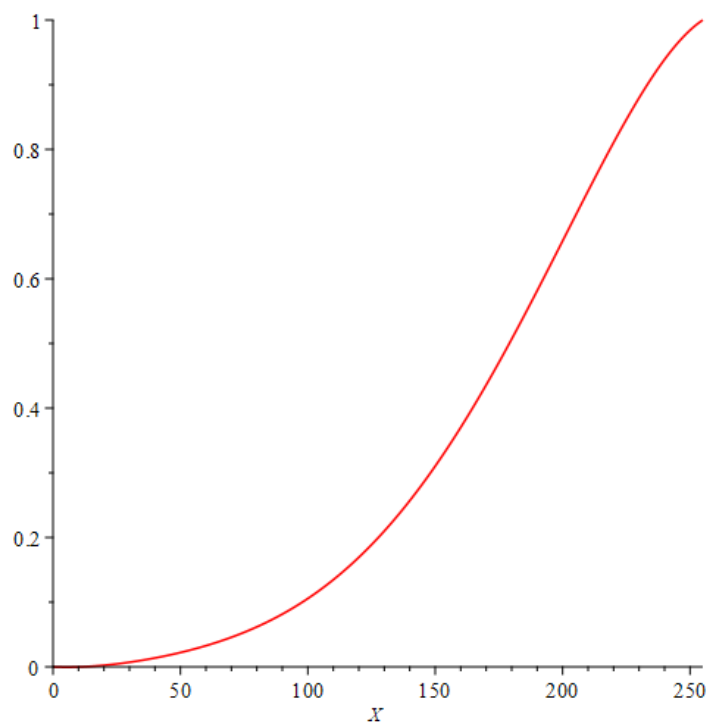


Рис. 53: Коэффициент интерполяционного многочлена y_{Gk210} , являющийся отношением многочлена на его максимум для яркости 210, y_{Gki210}

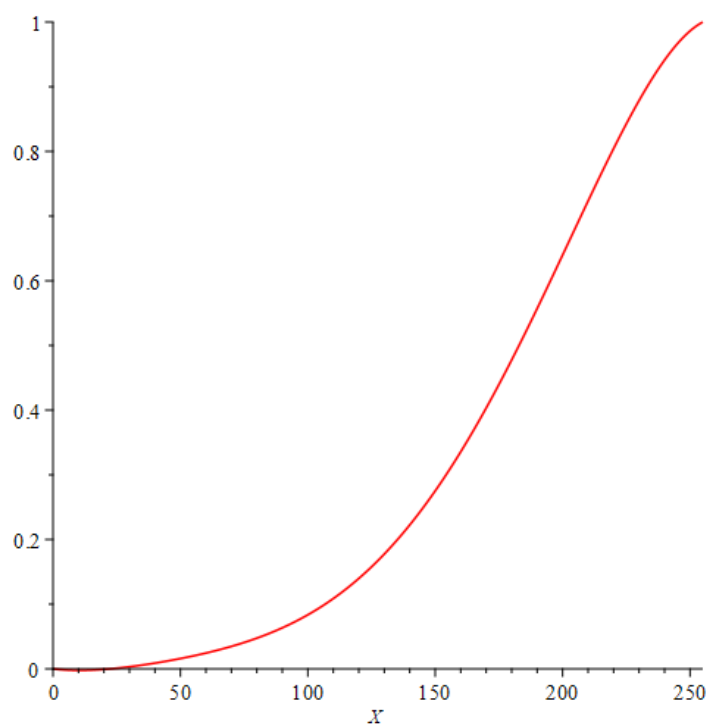


Рис. 54: Коэффициент интерполяционного многочлена y_{Gk255} , являющийся отношением многочлена на его максимум для яркости 255, y_{Gki255}

Список литературы

- [1] AMOLED Wiki // https://ru.wikipedia.org/wiki/Активная_матрица_на_органических_светодиодах.
- [2] Aaron Carroll Gernot Heiser. An Analysis of Power Consumption in a Smartphone. — URL: https://www.usenix.org/legacy/events/atc10/tech/full_papers/Carroll.pdf (online; accessed: 2021-12-3).
- [3] Deguang Li Bing Guo Yan Shen. Making Image More Energy Efficient for OLED Smart Devices. — 2016. — URL: https://www.google.com/url?q=https://www.hindawi.com/journals/misy/2016/6575931/&sa=D&source=docs&ust=1638488659219000&usg=A0vVaw1TrNF1oSjzkh28PQLxH_mi (online; accessed: 2021-12-3).
- [4] Liquid-crystal display Wiki // https://en.wikipedia.org/wiki/Liquid-crystal_display.
- [5] MINI-LED — ЖК-ДИСПЛЕЙ НА МАКСИМАЛКАХ. РАЗБОР // <https://droider.ru/post/mini-led-zhk-displej-na-maksimalkah-26-03-2021/>.
- [6] Mohammad Tawalbeha Alan Eardleya Lo'ai Tawalbehb. Studying the Energy Consumption in Mobile Devices. — 2016. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050916317756> (online; accessed: 2021-12-3).
- [7] Navitas Framework // <https://github.com/Stanislaw-Sartasov/Navitas-Framework>.
- [8] Overview of Micro-LED History and Current Developments // https://www.ledinside.com/outlook/2016/8/overview_of_micro_led_history_and_current_developments.
- [9] PMOLED display // <https://www.compel.ru/lib/124795>.

- [10] PenTile matrix family // https://en.wikipedia.org/wiki/PenTile_matrix_family.
- [11] Philippot Olivier. Should you switch your wallpaper to affect less the battery life of your smartphone? — 2017. — URL: <https://greenspector.com/en/should-you-switch-your-wallpaper-to-affect-less-the-battery-life> (online; accessed: 2021-12-3).
- [12] Raga Dylan. No, “AMOLED Black” Does NOT Save More Battery Than Dark Gray. — 2019. — URL: <https://www.xda-developers.com/amoled-black-vs-gray-dark-mode/> (online; accessed: 2021-12-3).
- [13] Recent Micro-LED News // <https://www.microled-info.com>.
- [14] Snapdragon Wiki // <https://ru.wikipedia.org/wiki/Snapdragon>.
- [15] An application for conducting an experiment on the energy consumption of the screen on a test stand // <https://github.com/artmotika/energy-consumption-screen-test-app>.
- [16] microLED // <https://en.wikipedia.org/wiki/MicroLED>.
- [17] Картинка из статьи Making Image More Energy Efficient for OLED Smart Devices // <https://www.hindawi.com/journals/misy/2016/6575931/tab1/>.
- [18] Картинка из статьи Making Image More Energy Efficient for OLED Smart Devices // <https://www.hindawi.com/journals/misy/2016/6575931/fig1/>.
- [19] Что такое PenTile и кто его видит? // https://club.cnews.ru/blogs/entry/import_что_такое_pentile_i_kto_ego_vidit_cf71.
- [20] ШИМ Wiki // https://ru.wikipedia.org/wiki/Широтно-импульсная_модуляция.