

# Техника нулевых пульсаций тока

Граир Антонян, Владимир Миняло (г. Ереван, Армения)

Анализ математической и физической моделей интегрированной магнитной цепи позволяет установить условия реализации эффекта нулевых пульсаций тока на входе или выходе преобразователей постоянного напряжения. Простота установленных количественных соотношений и, как результат, доступность технической реализации эффекта нулевых пульсаций способствует более широкому внедрению этого перспективного технического приёма.

Применение техники нулевых пульсаций в конвертерах постоянного тока, в частности, в схемах активного выпрямителя, ключевых регуляторах с нагрузкой, обладающей низким дифференциальным сопротивлением (дуговой разряд), позволяет обходиться без дорогостоящих и громоздких фильтров.

Несмотря на достаточно подробный анализ эффекта нулевых пульсаций [1, 2], наблюдается недооценка возможностей этой техники, обу-

словленная усложнённой и неточной его интерпретацией [3–5], затрудняющей выявление несомненных преимуществ применения интегрированных магнитных цепей в преобразователях постоянного тока.

Описание эффекта нулевых пульсаций на основе общего анализа интегрированной магнитной цепи преследует цель привлечь внимание разработчиков силовой электроники к этому перспективному техническому приёму фильтрации входных и/или выходных токов преобразователей постоянного напряжения.

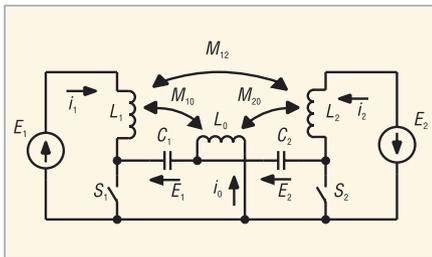


Рис. 1. Функциональная схема идеализированной модели конвертера Кука с интегрированной магнитной цепью

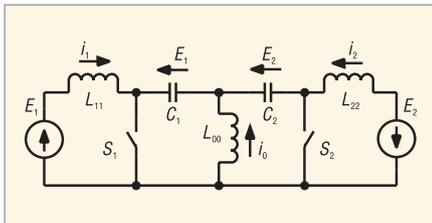


Рис. 2. Схема конвертера с отдельными индуктивностями

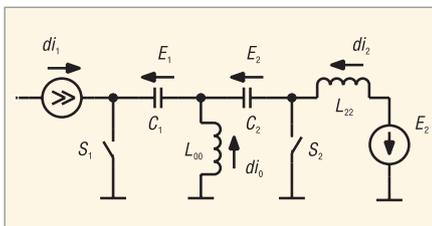


Рис. 3. Эквивалентная схема конвертера с двумя отличными от нуля собственными индуктивностями

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_0 & -M_{10} & -M_{20} \\ -M_{10} & L_1 & -M_{12} \\ -M_{20} & -M_{12} & L_2 \end{bmatrix} \times \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}$$

$$\text{или } \begin{bmatrix} \vec{v} \end{bmatrix} = [L] \times \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \vec{i} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $v_k$  – напряжение на индуктивности  $L_k$ .

Конвертер Кука характеризуется тем, что  $|v_0| = |v_1| = |v_2| = v$  в любой момент времени, т.е. вектор  $[\vec{v}]$  – суть одномерный, при этом

$$v = \begin{cases} E_1 & 0 < \phi \leq D \\ E_2 & D < \phi \leq 1 - D \end{cases},$$

где  $\phi$  – текущая фаза.

Так как матрица  $[L]$  действительная и симметрическая, при условии  $\det[L] \neq 0$  она может быть приведена к диагональной форме:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{00} & 0 & 0 \\ 0 & L_{11} & 0 \\ 0 & 0 & L_{22} \end{bmatrix} \times \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \end{bmatrix},$$

где  $L_{kk}$  – собственные значения матрицы  $[L]$  (собственные индуктивности магнитной цепи). (Вектор  $[\vec{v}]$  разлагается на три линейно независимые составляющие по собственным направлениям матрицы  $[L]$ ).

Этому соотношению соответствует схема конвертера с отдельными индуктивностями (см. рис. 2), эквивалентная схеме рис. 1. В данном случае ( $\det[L] \neq 0$ ) конвертер с интегрированной магнитной цепью качественно не отличается от конвертера с отдельными индуктивностями. Схема, показанная на рисунке 1, может характеризоваться качественными особенностями, если ранг матрицы  $[L]$ ,  $r < 3$ .

Если  $r = 2$ , то магнитная цепь будет характеризоваться двумя отличными от нуля собственными индуктивностями. Эквивалентная схема конвертера, соответствующая данному случаю, приведена на рисунке 3 при  $L_{11} = 0$  (выбор ветви с нулевой собственной индуктивностью носит произвольный характер).

Генератор тока  $di_1$  в цепи нулевой собственной индуктивности отража-

## ОБРАТИМЫЙ КОНВЕРТЕР КУКА С ИНТЕГРИРОВАННОЙ МАГНИТНОЙ ЦЕПЬЮ

Функциональная схема идеализированной модели конвертера Кука с интегрированной магнитной цепью приведена на рисунке 1. Коэффициент передачи в стационарном режиме при условии  $i_k \geq 0$  ( $k = 0; 1; 2$ ) в произвольный момент времени (режим непрерывного тока):

$$a = \frac{E_2}{E_1} = \frac{D}{1 - D},$$

где  $D$  – нормированное время проводящего состояния ключа  $S_1$  (ключи  $S_1$  и  $S_2$  переходят в проводящее состояние поочередно в течение времени  $D$  и  $1 - D$  соответственно).

В силу симметрии схемы, направление потока энергии неоднозначно, т.е. схема обратима и

$$a_1 = \frac{E_2}{E_1} = \frac{D_1}{1 - D_1}, \quad D_1 = 1 - D.$$

## АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Схема, приведённая на рисунке 1, описывается соотношением:

ет факт линейной зависимости данной компоненты вектора  $[\vec{i}^*]$ .

Требование  $di_m = 0$  (нулевая пульсация) в цепи с нулевой собственной индуктивностью ( $L_{mm} = 0$ ) удовлетворяется условием:

$$(L_j - L_{jj})(L_k - L_{kk}) - M_{jk}^2 = 0, k \neq m; j \neq m. \quad (2)$$

Значения изменений токов в цепях с ненулевыми собственными индуктивностями определяются уравнениями:

$$\frac{d}{dt} i_{k,j} = \frac{L_m - M_{mk,j}}{\Delta_{kj}} v_{k,j}, k \neq m; j \neq m, \quad (3)$$

где  $\Delta_{kj} \neq 0$  – соответствующее алгебраическое дополнение определителя уравнений (1).

Из уравнений (3) следует, что в цепях с ненулевыми собственными индуктивностями одновременно будет иметь место эффект нулевых пульсаций тока при условиях:

$$L_m = M_{mk} = M_{mj} \quad (4)$$

При этом изменение тока в цепи нулевой собственной индуктивности

$$\frac{di_m}{dt} = \frac{1}{L_m} v_m$$

будет определяться индуктивностью холостого хода данной цепи.

Если магнитная цепь характеризуется единственной ненулевой собственной индуктивностью  $L_{mm} = L_0 + L_1 + L_2$ , то преобразование вектора  $[\vec{v}^*]$  сводится к одномерному линейному преобразованию

$$\frac{di_m}{dt} = \frac{1}{L_{mm}} v_m.$$

Эквивалентная схема конвертера, соответствующая данному случаю, приведена на рисунке 4 для  $L_{22} \neq 0$ .

Аналогично можно составить схемы замещения при  $L_{00} \neq 0$  и  $L_{11} \neq 0$ . В рассматриваемом случае эффект нулевых пульсаций может иметь место только в одной из ветвей с нулевой собственной индуктивностью. Это объясняется тем, что линейно зависимые компоненты  $di_k$  и  $di_j$  не могут быть равными нулю одновременно. Все рассмотренные выше условия физически реализуемы, так как элементы матрицы  $[L]$  действительны.

В стационарном режиме конвертера эффект нулевых пульсаций не обусловлен характером внешних це-

пей и имеет место при замене любого из источников ( $E_1; E_2$ ) двухполюсником с импедансом любого характера, в том числе активным сопротивлением. Это объясняется тем, что генератор тока развязывает внешнюю цепь от магнитной цепи, а значение тока, в частности, нулевое, задается только параметрами магнитной цепи.

### ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Возможный вариант практической реализации интегрированной магнитной цепи с применением Ш-образного симметричного магнитопровода представлен на рисунке 5. Аналогичную магнитную цепь можно реализовать с помощью двух П-образных или тороидальных магнитопроводов. На рисунке 6 приведена соответствующая электрическая схема.

Для данной магнитной цепи справедливо соотношение:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{R_\mu} \begin{bmatrix} 2W_0^2 & -W_0W_1 & -W_0W_2 \\ -W_0W_1 & (1+m)W_1^2 & -mW_1W_2 \\ -W_0W_2 & -mW_1W_2 & (1+m)W_2^2 \end{bmatrix} \times \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

где  $V_0; V_1; V_2$  – напряжение на обмотках центрального и боковых стержней соответственно,

$$R_\mu = \frac{1}{\mu_0} \left[ \frac{2}{S_0} \left( \frac{b}{\mu} + \delta \right) + \frac{1}{S} \left( \frac{l_\mu - b}{\mu} + \delta \right) \right];$$

$$m = \frac{b(b + \mu\delta)}{b_0(l_\mu - b + \mu\delta)},$$

где  $b$  – средняя высота магнитопровода,  $l_\mu$  – средняя длина магнитной линии,  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость,  $\delta$  – толщина немагнитного зазора,  $S, S_0$  – поперечные сечения боковых и центрального стержней соответственно.

Обычно  $S_0 = 2S$ ; и

$$R_\mu = \frac{2}{\mu_0 S_0} \left( \frac{l_\mu}{\mu} + 2\delta \right);$$

$$m = 0,5 \frac{b + \mu\delta}{l_\mu - b + \mu\delta}. \quad (6)$$

Если магнитная цепь реализована двумя одинаковыми тороидальными магнитопроводами с линейной характеристикой намагничивания (с распределенным зазором) и с обмот-

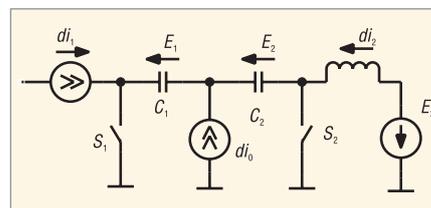


Рис. 4. Эквивалентная схема конвертера с единственной ненулевой собственной индуктивностью

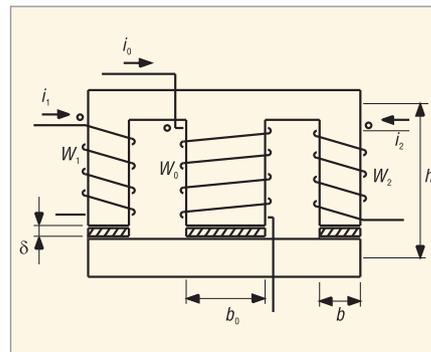


Рис. 5. Вариант реализации интегрированной магнитной цепи с применением Ш-образного симметричного магнитопровода

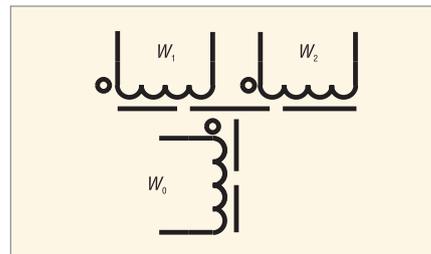


Рис. 6. Электрическая схема магнитной цепи, реализованной с помощью двух П-образных или тороидальных магнитопроводов

ками, равномерно распределенными по периметру, то

$$R_\mu = \frac{2l_\mu}{\mu\mu_0 S}, m = 0,5.$$

Соотношение (5) справедливо при следующих допущениях:

- активные потери в обмотках и в магнитопроводе равны нулю;
- потоки вне магнитопровода отсутствуют;
- $\delta \ll l_\mu, d \ll b$ .

Определитель системы уравнений (5) равен нулю ввиду закона Кирхгофа для магнитных потоков

$$\sum \frac{V_i}{W_i} = 0,$$

а все миноры второго порядка отличны от нуля. Таким образом, магнитная цепь, показанная на рисунке 5, характеризуется двумя отличными от нуля собственными индуктивностями и может быть использована для

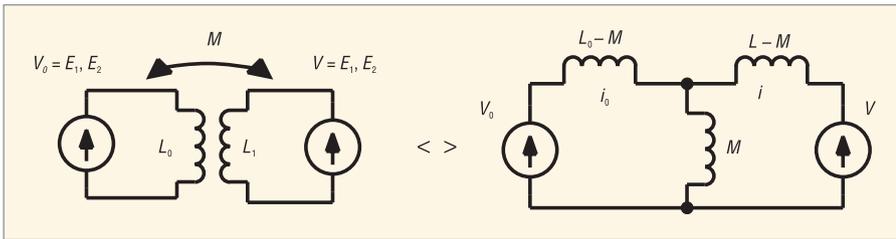


Рис. 7. Эквивалентное преобразование реального трансформатора

получения эффекта нулевых пульсаций.

Допустим, что потоки в боковых стержнях равны

$$\frac{V_1}{W_1} = \frac{V_2}{W_2}$$

(необязательно, но целесообразно с практической точки зрения), тогда естественно полагать (из соображений симметрии)  $L_{00} = 0, L_{11} \neq 0, L_{22} \neq 0$ , причём  $L_{11} = \frac{W_1^2}{R_\mu}, L_{22} = \frac{W_2^2}{R_\mu}$  (см. диагонализация матрицы), тогда:

- требование  $di_0 = 0$  в соответствии с (2) удовлетворяется при условии  $W_1 = W_2 = 2W_0$ ,
- требование  $di_0 = di_2 = 0$  в соответствии с (4) удовлетворяется также при условии  $2W_0 = W_1 = W_2$ .

Таким образом, идеализированная физическая модель интегрированной магнитной цепи характеризуется неоднозначностью локализации эффекта нулевых пульсаций, т.к. условия нулевых пульсаций в цепях нулевой или отличных от нуля собственных индуктивностей являются идентичными.

На практике  $W = 2(1+q)W_0$ , если  $q > 0$ , то имеет место эффект нулевых пульсаций в обмотках  $W_1$  и  $W_2$  одновременно. Если  $q < 0$ , то имеет место эффект нулевых пульсаций в обмотке  $W_0$ .

Это объясняется тем, что нулевая пульсация достигается при балансе (в отсутствие обмена энергии) между э.д.с. самоиндукции обмотки с э.д.с. внешнего источника ( $E_1, E_2$ ). Для этого

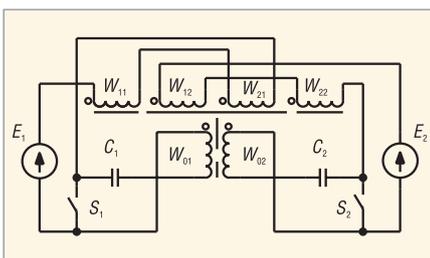


Рис. 8. Обратимый конвертер Кука с нулевыми пульсациями, гальванической развязкой и произвольным коэффициентом трансформации

необходимо скомпенсировать реактивные потери (падение напряжения на индуктивностях рассеяния) путём увеличения э.д.с. самоиндукции той обмотки, в цепи которой необходимо обеспечить нулевую пульсацию тока.

Эквивалентное преобразование реального трансформатора, показанного на рисунке 7, даёт наглядную интерпретацию вышеизложенного. В данном случае обмотка центрального стержня рассмотрена как первичная, а боковые – как вторичные обмотки трансформатора. При  $L_0 = M di = 0$ , а при  $L = M di_0 = 0$ .

На практике в схемах конвертеров с двумя индуктивностями последовательное соединение обмоток боковых стержней в некоторых случаях может оказаться удобнее.

При этом  $W_1 = W_2 = W = W_0$ , а точнее,  $W = (1+q)W_0$ .

В отличие от принятого представления, обратимый конвертер Кука с нулевыми пульсациями можно реализовать с гальванической развязкой и с произвольным коэффициентом трансформации, как показано на рисунке 8:

$$W_{11} = W_{21} = 2(1+q_1)W_{01};$$

$$W_{12} = W_{22} = 2(1+q_2)W_{02};$$

$$n = \frac{W_{02}}{W_{01}}; \quad \frac{I_2}{I_1} = n \frac{D}{1-D}$$

### МЕТОДИКА ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

Основой для определения числа витков и толщины немагнитного зазора является система уравнений для потоков:

$$\begin{bmatrix} \Phi_0 \\ \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_0 S_0 \\ B_1 S \\ B_2 S \end{bmatrix} = \frac{1}{R_\mu} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 1+m & -m \\ -1 & -m & 1+m \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} W_0 i_0 \\ W_1 i_1 \\ W_2 i_2 \end{bmatrix}$$

С целью равномерного распределения магнитного потока по объёму

магнитопровода, ( $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi$ ) следует соблюдать условие  $W_1 = W_2 = W$ . При этом  $i_1 = i_2 = i$ . Поскольку на практике в большинстве случаев  $S_0 = 2S$ , то  $B_1 = B_2 = B_0 = B$ . Для облегчения процедуры эмпирического уточнения параметра  $q$  рекомендуется намотать количество витков в  $1 + |q|$  раза больше расчетного

$$W'_0 = (1+|q|)W_0 = (1+|q|) \frac{V \Delta t}{\Delta B S_0},$$

где  $\Delta B$  – полный размах индукции за время  $\Delta t$ , а значение толщины немагнитного зазора устанавливается равным:

$$\delta = \frac{\mu_0 (Wi)_{\max}}{2 \left( B_p - \frac{\Delta B}{2} \right)} - \frac{I_\mu}{2\mu},$$

где  $B_p$  – пиковое значение магнитной индукции,  $(Wi)_{\max}$  – максимальное значение ампер-витков цепи с нулевой пульсацией.

Наблюдая за ходом уменьшения пульсации в требуемой цепи при оттаивании витков обмотки, через которые должна протекать переменная составляющая тока, добиваются эффекта нулевой пульсации. После эмпирического уточнения параметра  $q$  можно пересчитать толщину немагнитного зазора. Обмотку, через которую предполагается протекание переменной составляющей тока, желательно намотать проводом типа «литцентрат».

Как показывает опыт, при изготовлении магнитных компонентов, реализующих эффект нулевых пульсаций в преобразователях постоянного тока, необходимости индивидуального эмпирического уточнения параметра  $q$  не возникает. Для Ш-образных магнитопроводов  $|q| = 0,15...0,25$ , а для магнитопроводов П и О  $|q| = 0,05...0,15$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. Cuk S. Switching DC-to-DC Converter with Zero Input or Output Current Ripple. IEEE Industry Applications Society. Annual Meet. 1978 (IEEE 780H 1346-61A).
2. Ненахов С. Новый DC/DC-преобразователь с нулевыми пульсациями. Силовая электроника, 2004. № 2.
3. Милешин В. Транзисторная преобразовательная техника. Техносфера, 2005.
4. Modern DC-DC Switch mode converter circuits. Siverns&Blum.
5. Gorianski I. A New Zero-Ripple Technique for switch mode Supplies. <http://moscow-it.hotmail.ru/SMPS/1998>.



Новости мира News of the World Новости мира

**Сверхтонкие осветительные LED-модули из Кореи**

Южнокорейская компания Seoul Semiconductor заявила о выпуске новых сверхтонких светодиодных элементов освещения серии Z1, отличающихся довольно малой потребляемой мощностью и длительной работой в условиях высоких температур.

Новинки представлены в двух вариантах. Модель NZ10150 («тёплый» белый свет) отличается максимальной яркостью 95 лм и средней яркостью 80 лм. Для WZ10150 («чистый» белый свет) эти показатели составляют соответственно 120 и 105 лм.

Светодиодные модули характеризуются потребляемой мощностью 1,4 Вт, а их толщина составляет всего 1,2 мм. Из особенностей стоит отметить керамический корпус с высокой теплопроводностью.

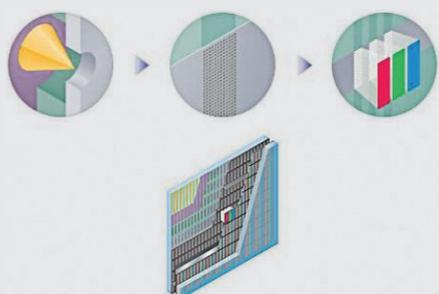
По словам разработчиков, их устройства могут использоваться для наружного освещения, в символьных дисплеях различных приборов, при создании красивых интерьеров, в качестве подсветки в холодильниках. Конечно же, этим сфера их применения не ограничивается.

*Tech-On!*

**Sony показала 240-Гц FED-дисплей в действии**

Довольно длительное время мы не получали интересных новостей из мира дисплеев с автоэлектронной эмиссией (FED, field emission display), но это совсем не значит, что производители больше не ведут работы в этом направлении. И ярким подтверждением тому является демонстрация новой совместной разработки компаний Sony и FE Technologies (компания создана в 2006 г. инвестиционным фондом Technology Carve-Out Investment Fund и Sony) – FED-панели, способной обновлять картинку со скоростью 240 кадров в секунду.

В рамках шоу с помощью четырёх параллельно работающих игровых приставок Sony PlayStation3 на 19-дюймовом FED-дисплее отображалось действие игры Gran Turismo 5. При этом частота обновления достигала впечатляющих 240 FPS.



Попутно компания Sony предоставила немного интересной информации о новинке. FED-дисплей использует технологию nano-Spindt, которая представляет собой массив огромного количества электронных эмиттеров конусообразной формы. Каждый пиксель включает 10 тыс. таких наноизлучателей. Электроны попадают на флюоресцентную панель, что вызывает свечение экрана.

Фактически каждая точка экрана представляет собой аналог электронно-лучевой трубки. Благодаря большому количеству эмиттеров, выход из строя даже 10...20% из них не вызовет заметных изменений в яркости свечения пикселя. По заявлению разработчиков, к достоинствам FED-дисплея по сравнению с традиционной LCD-технологией относятся более широкие углы обзора, возможность отображать «настоящий» чёрный цвет, богатый набор всевозможных цветовых оттенков, отображение видео без смазывания границ благодаря высокой частоте обновления. По словам очевидцев, разница между традиционным дисплеем и 240-Гц FED просто шокирующая.

Главными вопросами остаются временные рамки внедрения FED-дисплеев в массовое производство, а также их себестоимость. К сожалению, они пока остаются без ответа.

*sonyinsider.com*

**Pan-STARRS: 1,4-гигапиксельная камера для слежки за НЛО**

Три года назад Конгресс США обязал учёных NASA разработать систему, с помощью которой можно было бы находить и идентифицировать любые космические объекты, находящиеся в непосредственной близости от Земли и имеющие размеры более чем 140 м в поперечнике.

Выполнить это задание взялись учёные из Гавайского университета астрономии (University of Hawaii's Institute for Astronomy), и совсем недавно они представили первые результаты своей работы – проект под названием Pan-STARRS (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System). Если говорить коротко, то Pan-STARRS представляет собой огромную цифровую камеру, с помощью которой специалисты будут «сканировать» небо. Это устройство планируется установить в обсерватории на горе Халекала (Haleakala), что на Гавайях. Согласно имеющимся данным, Pan-STARRS позволяет генерировать картинку с разрешением 38000 × 38000 пикселей, что в 200 раз превышает возможности сов-



ременных цифровых камер верхнего ценового диапазона.

*newlaunches.com*

**OLED-панель от Samsung толщиной 0,05 мм**

На выставке FPD International 2008, прошедшей в Японии, было представлено множество интереснейших дисплеев. Напомним, свои новые разработки на это мероприятие привезли такие крупные производители, как AU Optronics, Epson, NEC, Chi Mei, Chunghwa Picture Tubes и многие другие. Не могла пропустить такое событие и южнокорейская компания Samsung.



Ультратонкая 4-дюймовая OLED-панель, которая получила имя flapping display (можно перевести как «колыхающийся дисплей») имеет толщину всего 0,05 мм. При этом, как отмечают разработчики, технически возможно сделать саму панель ещё более тонкой, но появляются трудности с уменьшением толщины подложки и периферийных схем. Слой OLED-диодов был сформирован с помощью напыления на стеклянную основу, а управляющая схема спроектирована на базе низкотемпературных поликремниевых тонкоплёночных транзисторов. Также были использованы низкомолекулярные материалы на основе электролюминесцентной органики.

Из технических характеристик дисплея отмечены: разрешение 480 × 272 пикселей, контрастность 100 000 : 1, яркость 200 нит, 100% цветовой охват по шкале NTSC. На стенде Samsung экспонат находился в свисающем положении и красиво развеивался под действием воздушного потока от специально установленного вентилятора.

*Tech-On!*