

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДАТЧИКА ВСТРОЕННОГО КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ МАТРИЧНОГО ФОТОПРИЁМНИКА

© 2011 Д. В. Корнилин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Приводится описание способа определения размеров частиц загрязнения гидрожидкости с помощью датчика встроенного контроля на основе матричного фотоприёмника. Рассматривается случай, когда размер частиц загрязнения меньше размеров пикселя матричного фотоприёмника. Получено аналитическое выражение, позволяющее определять размер частицы в зависимости от относительной величины заряда, накопленного пикселем КМДП-матрицы. Производится оценка чувствительности матричного фотоприёмника при заданном отношении сигнал/шум.

*Датчик встроенного контроля, диагностика гидросистем, матричный фотоприёмник, дисперсная фаза, размер, чувствительность.*

Необходимость улучшения основных параметров современных гидросистем приводит к повышению рабочих давлений. Следствием этого является уменьшение массогабаритных показателей гидросистем, а также зазоров в трущихся парах гидроагрегатов [1]. Уменьшаются и размеры частиц загрязнения, возникающих в процессе разрушения трущихся пар и переносимых гидрожидкостью [2]. Эти частицы приводят к нарушению работы узлов гидроагрегатов [2]. Соответственно повышаются требования к средствам диагностики гидросистем по параметрам частиц износа. Одними из таких средств являются разработанные в 80-х годах в СГАУ датчики встроенного контроля (ДВК) [3] гидросистем на основе фотоэлектрического метода [4, 5]. На выходе ДВК амплитуда импульса напряжения, при определённых условиях [6], пропорциональна квадрату диаметра частицы загрязнения с коэффициентом  $k$ , определяемым конструкцией преобразователя [4]:

$$U = k \cdot d^2, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, В/мкм<sup>2</sup>;  $d$  – диаметр частицы, мкм.

В настоящее время в ДВК в качестве чувствительного элемента используется одиночный фотоприёмник (фотодиод). Его применение позволяет достичь чувствительности порядка 5 мкм (при соотношении сигнал/шум, равном трём). В соответствии с ГОСТ 17216-2001 необходимо определение дисперсного состава частиц загрязнения, начиная с 0,5 мкм. Чувствительность ДВК с одиночным фотодиодом может быть увеличена за счёт уменьшения диафрагмы, ограничивающей чувствительную область фотоприёмника [7]. Чувствительность увеличивается в связи с уменьшением шума фотодиода, поскольку этот шум пропорционален величине светового потока. Однако прямая реализация описанного метода в ДВК затруднена, поскольку уменьшение диафрагмы приводит к уменьшению длительности импульса от частицы и, следовательно, расширению полосы пропускания усилителя, что также приводит к увеличению уровня шума на выходе ДВК [7]. В то же время применение системы с интегрированием выходного сигнала, как показано в [7], позволит получить выигрыш в отношении сигнал/шум. Указанным условиям (минимальный размер чувствительного элемента и интегрирование выходного сигнала)

удовлетворяют матричные фотоприёмники. В них размер чувствительного элемента (пикселя) может составлять 2 мкм.

В данной статье рассматриваются вопросы, связанные с определением размера частицы с помощью матричного фотоприёмника (КМДП или ПЗС-матрицы), а также повышения чувствительности ДВК.

С целью определения чувствительности матричного фотоприёмника рассмотрим следующий случай. Примем, что поверхность матрицы освещена равномерно. Над поверхностью матрицы со скоростью  $v$  движется частица кубической формы (величина ребра равна  $a$ ). Допустим, что величина тени от частицы на поверхности матрицы соответствует проекции этой частицы. Чувствительность ДВК на основе матричного фотоприёмника представляет собой минимальный размер частицы, который возможно определить при заданном отношении сигнал/шум. Поэтому будем рассматривать случай, когда размер частицы ( $a$ ) меньше или равен размеру пикселя ( $p$ ). Пусть частица за время экспозиции  $t_3$  пролетает над несколькими пикселями. На рис. 1 представлена геометрическая интерпретация

процесса движения частицы над пикселями матрицы.

Началу отсчёта времени экспозиции  $t_3$  соответствует положение частицы 1, окончанию времени экспозиции соответствует положение частицы 6. За время экспозиции частица пролетает расстояние  $L$ , перекрывая общее число пикселей  $N_p$ .

Определим величину сигнала на выходе центрального пикселя (выделен на рис. 1). Рассмотрим эквивалентную схему пикселя КМДП-матрицы. Её можно представить в виде последовательно соединённых фотодиода  $VD1$  и конденсатора  $C_{COL}$  [8] (рис. 2). Также на рис. 2 представлены элементы схемы считывания и сброса ( $V1, V2, V3, V4$ ). В течение времени экспозиции посредством управления элементами  $V1, V2, V3, V4$  фотодиод  $VD1$  подключается к конденсатору  $C_{COL}$ , заряжая его фототоком, пропорциональным величине освещённости пикселя. По окончании времени экспозиции в следующем такте работы матрицы происходит отключение фотодиода от конденсатора, считывание величины накопленного заряда и затем разряд конденсатора. Далее процесс повторяется для

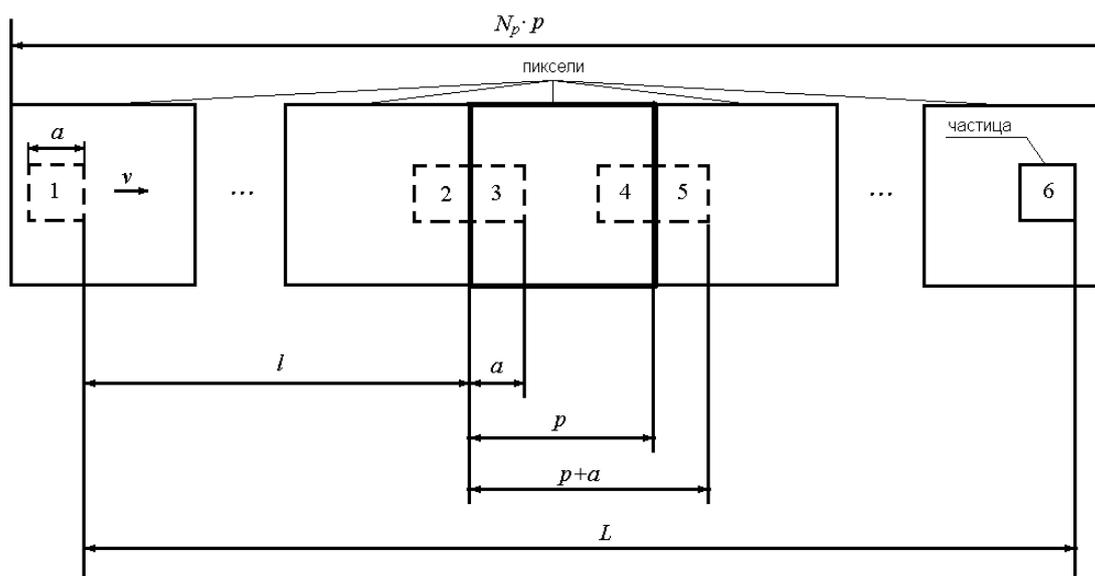


Рис. 1. Геометрическая интерпретация процесса движения кубической частицы над матричным фотоприёмником

следующего кадра. Таким образом, выходной сигнал пикселя представляет собой величину заряда, накапливаемого конденсатором пикселя в течение времени экспозиции. Величину заряда в пикселе  $q_p$  будем определять путём интегрирования фототока  $i_p$ :

$$q_p(t) = \int_0^t i_p(t) dt . \quad (2)$$

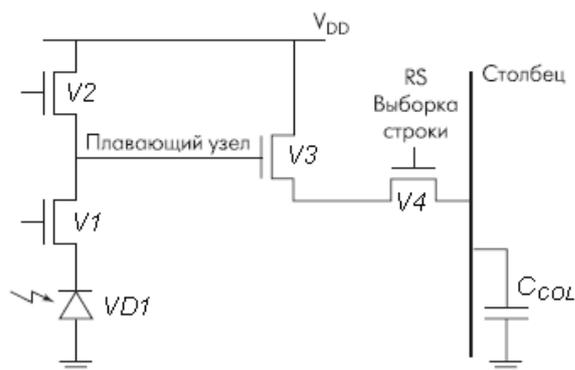


Рис. 2. Эквивалентная схема одиночного пикселя КМДП-матрицы

Определим зависимость изменения фототока  $i_p$  центрального пикселя от времени при пролёте над ним частицы за время экспозиции (рис. 3, кривая б).

В начальный момент времени частица движется над первым пикселем (положение 1, рис. 1). При этом центральный пиксель полностью освещён, ток фотодиода пикселя (VD1) постоянный и равен  $I_0$ . В момент времени  $l/v$  частица начинает движение над центральным пикселем (положение частицы 2). Величина фототока уменьшается, поскольку частица начинает закрывать пиксель от источника излучения. Проекция частицы окажется полностью в границах пикселя (положение 3) в момент времени  $l/v+a/v$ . При движении частицы «внутри» пикселя фототок будет постоянен по величине, обозначим его  $I_p$ .

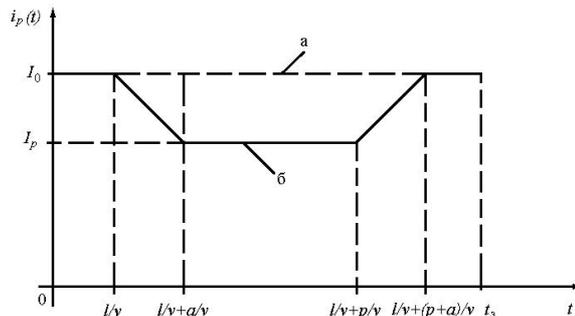


Рис. 3. Зависимость фототока одиночного пикселя от времени для полностью освещаемого в течение времени экспозиции пикселя (а) и перекрываемого частицей (б)

К моменту времени  $l/v+p/v$  частица заканчивает движение над центральным пикселем (положение 4), величина фототока возрастает. Частица «покидает» пределы центрального пикселя (положение 5) в момент времени  $l/v+(p+a)/v$ . Величина фототока вновь становится равной  $I_0$ . К окончанию времени экспозиции  $t_3$  положение частицы соответствует б.

Таким образом, величина заряда (2), накопленного центральным пикселем, равна

$$q_p = \int_0^{t_3} i_p(t) dt = \int_0^{l/v} i_p(t) dt + \int_{l/v}^{l/v+a/v} i_p(t) dt + \int_{l/v+a/v}^{l/v+p/v} i_p(t) dt + \int_{l/v+p/v}^{l/v+(p+a)/v} i_p(t) dt + \int_{l/v+(p+a)/v}^{t_3} i_p(t) dt \quad (3)$$

Из (3) получим

$$q_p = I_0 \times t_3 - I_0 \times \frac{p}{v} + I_p \times \frac{p}{v} . \quad (4)$$

Определим величину тока  $I_p$ . Очевидно, что отношение токов  $I_0$  и  $I_p$  будет пропорционально отношению площадей пикселя  $p^2$  и разности площадей пикселя и частицы  $p^2 - a^2$ :

$$\frac{I_p}{I_0} = \frac{p^2 - a^2}{p^2} . \quad (5)$$

Определяя  $q_p$  с учётом (5), получим

$$q_p = I_0 \times t_3 - I_0 \times \frac{a^2}{p \times v}. \quad (6)$$

Выражение (6) связывает величину заряда, накопленного пикселем, с размером частицы  $a$ , скоростью её движения  $v$ , а также с параметрами матричного фотоприёмника: временем экспозиции  $t_3$  и размером пикселя  $p$ . Яркость источника освещения характеризует величина тока  $I_0$ . Таким образом, выражение (6) определяет взаимосвязь выходного параметра датчика (в виде заряда пикселя) со входными параметрами (размером и скоростью частицы), значит (6) можно считать математической моделью ДВК на основе матричного фотоприёмника (для рассматриваемого случая). Выражение (6) может быть использовано на практике для определения фактического размера частиц. Неизвестными величинами являются ток  $I_0$  и скорость частицы  $v$ .

Определим величину тока  $I_0$ . Для этого используем величину заряда  $q_0$ , накопленного любым другим пикселем матрицы, над которым за время экспозиции не пролетала частица (рис. 3, кривая а):

$$q_0 = \int_0^{t_3} I_0 dt = I_0 \times t_3. \quad (7)$$

Обозначим разность  $\Delta q = q_0 - q_p$ , и подставив (7) в (6), получим

$$\frac{\Delta q}{q_0} = \frac{a^2}{p \times v \times t_3}. \quad (8)$$

Выразим из (8) размер частицы  $a$ :

$$a = \sqrt{\frac{\Delta q}{q_0} \times p \times v \times t_3}. \quad (9)$$

Определим скорость движения частицы  $v$  из очевидного соотношения (рис. 1):

$$v = \frac{L}{t_3}, \quad (10)$$

где  $L$  – расстояние, на которое перемещается частица за время экспозиции.

Для точного определения расстояния  $L$  необходимо иметь информацию о положениях частицы, соответствующих началу отсчёта времени экспозиции и по его истечении (положение 1 и 6 на рис. 1). Получить эту информацию с помощью матрицы затруднительно. Можно лишь говорить о том, что частицы находятся (находились) внутри этих пикселей. Поэтому расстояние  $L$  оценим с помощью неравенства

$$(N_p - 2) \times p \leq L \leq N_p \times p. \quad (11)$$

Примем за расстояние  $L$  значение из середины указанного диапазона (11):

$$L = (N_p - 1) \times p. \quad (12)$$

С учётом (12) и (10) выражение (9) примет вид

$$a = p \sqrt{\frac{\Delta q}{q_0} \times (N_p - 1)}. \quad (13)$$

Выражение (13) позволяет определять размер квадратной частицы  $a$ . Размер пикселя  $p$  является константой. Относительное изменение заряда пикселей может быть получено с помощью матрицы. Число пикселей  $N_p$ , которые покрывает частица при движении над матрицей за время экспозиции, может быть определено путём обработки изображения.

В соответствии с ГОСТ 17216-2001 при контроле загрязнения гидрожидкости автоматическими счётчиками частиц (в

том числе и с помощью ДВК) размером частицы считается эквивалентный диаметр сферической частицы, имеющей такую же площадь, как контролируемая.

Для определения эквивалентного диаметра  $d$  сферической частицы приравняем их площади:

$$a^2 = \frac{\pi \times d^2}{4}. \quad (14)$$

Из (13) с учётом (14) получим

$$d = \frac{2 \times p}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\Delta q}{q_0} \times (N_p - 1)}. \quad (15)$$

Определим потенциальную чувствительность ДВК с матричным фотоприёмником при заданном отношении сигнал/шум. Шумы матричных фотоприёмников, как правило, выражаются через эквивалентное шуму количество электронов (заряд конденсатора, вызванный шумом) [8]. Обозначим величину шумового заряда как  $q_{ш}$ . Отношение сигнал/шум с учётом (8) имеет вид

$$\frac{\Delta q}{q_{ш}} = \left[ \frac{c}{ш} \right] = \frac{q_0}{q_{ш}} \times \frac{a^2}{p \times v \times t_s}. \quad (16)$$

Из формулы (16) следует, что отношение будет максимальным в случае, когда размер пикселя равен размеру частицы. Приравнявая  $p = a$ , получим

$$\left[ \frac{c}{ш} \right] = \frac{q_0}{q_{ш}} \times \frac{p}{v \times t_s} \quad (17)$$

или, с учётом (10),

$$\left[ \frac{c}{ш} \right] = \frac{q_0}{q_{ш}} \times \frac{p}{L}. \quad (18)$$

Согласно (11) и (12), минимальное значение  $L=p$ . Тогда (18) имеет вид

$$\left[ \frac{c}{ш} \right] = \frac{q_0}{q_{ш}}, \quad (19)$$

то есть отношение сигнал/шум при введённых допущениях ( $p = a$ ,  $L=p$ ) полностью определяется величиной максимально возможного накапливаемого заряда  $q_0$  в пикселе, над которым не пролетает частица.

Вычислим значение выражения (19) для матрицы типа MT9V032C12STM [9] с размером пикселя 6 мкм:

$$\left[ \frac{c}{ш} \right] = \frac{46000}{150} = 307.$$

Это означает, что для частицы 6 мкм отношение сигнал/шум будет равно 307. Определим чувствительность матрицы при отношении сигнал/шум, равном трём. Из (16) с учётом (10) получим, что размер частицы будет равен

$$a = p \times \sqrt{\frac{q_{ш}}{q_0} \times \left[ \frac{c}{ш} \right]} = 6 \times \sqrt{\frac{150}{46000} \times 3} = 0,6 \text{ мкм}.$$

Определим время экспозиции, соответствующее потенциальной чувствительности, из (10) с учётом ранее введённого допущения  $L=p$  и скорости частицы 1 м/с:

$$t_s = \frac{p}{v} = \frac{6 \text{ мкм}}{1 \text{ мкм/мкс}} = 6 \text{ мкс}.$$

Следует отметить, что для ДВК с одиночным фотоприёмником чувствительность составляет около 5 мкм при отношении сигнал/шум, равном трём. Таким образом, использование матричного фотоприёмника потенциально позволит повысить чувствительность ДВК на порядок.

## Библиографический список

## References

1. Алексеева, Т. В. Техническая диагностика гидравлических приводов [Текст] / Т. В. Алексеева, В. Д. Бабанская, Т. М. Башта [и др.]; под общ. ред. Т. М. Башты. – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.
2. Никитин, Г. А. Влияние загрязнённости жидкости на надёжность работы гидросистем летательных аппаратов [Текст] / Г. А. Никитин, С. В. Чирков. – М.: Транспорт, 1969. – 184 с.
3. ГОСТ Р 51109-97. Промышленная чистота. Термины и определения [Текст] – Введ. 1997-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1997. – 25 с.
4. Логвинов, Л. М. Современные методы автоматизированного контроля чистоты рабочих жидкостей гидравлических и топливных систем [Текст] / Л. М. Логвинов, В. М. Добромислин, В. А. Кузнецов, Л. В. Бобылев // Межотраслевая техника и экономика. Сер. Т.; вып. 4. – 1979.
5. А.с. 1104395 СССР, G01N 15/02. Фотоэлектрическое устройство для измерения размера и счётной концентрации частиц в потоке жидкости [Текст] / Л. М. Логвинов, А. Ф. Воронов, Ю. А. Маланичев, В. А. Кузнецов (СССР). – Оpubл. 23.07.84, Бюл. № 27.
6. Большаков, Г. Ф. Экспресс-методы определения загрязнённости нефтепродуктов [Текст] / Г. Ф. Большаков, В. Ф. Тимофеев, И. И. Сибарова; под. ред. проф. Г. Ф. Большакова. – Л.: Химия, 1977. – 168 с.
7. Кудрявцев, И. А. Повышение разрешающей способности и чувствительности фотоэлектрических преобразователей встроенного контроля дисперсной фазы для систем управления [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Кудрявцев Илья Александрович. – Самара, 1999. – 140 с.
8. Стемповский, А. И. КМОП-фотодиодные СБИС [Текст] / А. И. Стемповский, В. А. Шилин // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2003. – №2. – С. 14-20.
9. Aptina Imaging – Image sensors – MT9V032C12STM [Электронный ресурс] / [http://www.aplina.com/products/image\\_sensor/s/mt9v032c12stm/#overview](http://www.aplina.com/products/image_sensor/s/mt9v032c12stm/#overview) – 12.04.2010.
1. Alekseeva, T. V. Technical diagnostics of hydraulic steering gears [Text] / T. V. Alekseeva, V. D. Babansky, T. M. Basta [et. al.]; ed. T. M. Basta. – M.: Mashinostroenie, 1989. – 264 p.
2. Nikitin, G. A. Effect of liquid contamination on the reliability of hydraulic systems of aircraft [Text] / G. A. Nikitin, S. V. Chirkov. – M.: Transport, 1969. – 184 p.
3. GOST 51109-97. Industrial purity. Terms and definitions [Text] – Intr. 1997-01-01. – Moscow: Standards Publishing House, 1997. – 25 p.
4. Logvinov, L. M. Modern methods of automated purity control of a hydraulic fluid and fuel systems [Text] / L. M. Logvinov, V. M. Dobromyslin, V. A. Kuznetsov, L. V. Bobylev // Industry technology and economics. TV Ser.; vol. 4. – 1979.
5. Patent 1104395 USSR, G01N 15/02. Photoelectric device for measuring the size and number concentration of particles in a fluid flow [Text] / L. M. Logvinov, A. F. Voronov, Yu. A. Malanichev, V. A. Kuznetsov (USSR). – Publ. 23.07.84, Bull. № 27.
6. Bolshakov, G. F. Proximate methods for determining the contamination of petroleum products [Text] / G. F. Bolshakov, V. F. Timofeev, I. I. Sibarova; ed. G. F. Bolshakov. – Leningrad: Khimiya (Chemistry), 1977. – 168 p.
7. Kudryavtsev, I. A. Finer resolution and sensitivity of photovoltaic cells of built-in control of the dispersed phase for control systems [Text]: dis. ... cand. of techn. science / Kudryavtsev Ilya. – Samara, 1999. – 140 p.
8. Stempkovsky, A. I. CMOS Photodiode VLSIs [Text] / A. I. Stempkovsky, V. A. Shilin // Electronics: Science, Technology, Business. – 2003. – №2. – PP. 14-20.
9. Aptina Imaging – Image sensors – MT9V032C12STM [electronic resource] / [http://www.aplina.com/products/image\\_sensor/s/mt9v032c12stm/#overview](http://www.aplina.com/products/image_sensor/s/mt9v032c12stm/#overview) – 12.04.2010.

---

## MATHEMATICAL MODEL OF THE INLINE SENSOR BASED ON MATRIX PHOTODETECTOR

© 2011 D. V. Kornilin

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

The paper deals with the description of the method for the measurement of particle sizes using an inline sensor based on matrix photodetector. The case when the size of particles is smaller than the size of matrix sensor pixel is described. An analytical formula is proposed for particle size estimation depending on the charge accumulated by the pixel of CMOS matrix. The authors evaluate the sensitivity of the CMOS sensor at a given signal/noise ratio.

*Inline sensor, diagnostics of hydraulic systems, matrix photodetector, dispersed phase, size, sensitivity.*

### Информация об авторах

**Корнилин Дмитрий Владимирович**, ассистент, кафедра радиотехнических устройств, инженер ОНИЛ-16 «Радиоэлектронные методы и устройства диагностики систем летательных аппаратов», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), [kornilin@mail.ru](mailto:kornilin@mail.ru). Область научных интересов: радиоэлектронные методы и устройства диагностики, определение параметров дисперсных систем.

**Kornilin Dmitry Vladimirovich**, assistant, the department of radioelectronic devices, an engineer of Laboratory 16 «Radioelectronic diagnostic methods and devices of aircraft systems», Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), [kornilin@mail.ru](mailto:kornilin@mail.ru). Area of research: radio-diagnostic techniques, monitoring parameters of disperse systems.