

ПРОСТОЙ МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ФУОЗ

Доступность технически совершенных микроконтроллеров (МК) сделала возможным проектирование различного вида микропроцессорных систем зажигания (МПСЗ). Описание разработок на разных МК легко найти в сети [1]-[6]. Есть как достаточно простые разработки, например популярная прошивка Саруман [1] и её клоны, так и очень серьезные, например SECU-3 [2].

Неотъемлемой частью МПСЗ является математический алгоритм, позволяющий формировать угол опережения зажигания (УОЗ) для цилиндра по заданному закону в зависимости от скорости вращения маховика. Алгоритм работы системы формирования УОЗ (ФУОЗ) достаточно прост. Сигналы с датчиков поступают на входы МПСЗ. Программа ФУОЗ на МПСЗ производит измерение времени текущего оборота маховика с помощью опорного таймера - n тактов таймера опорной частоты. По этому значению производится расчет необходимой временной задержки для работы формирователя импульса зажигания по заданному закону изменения угла опережения зажигания (УОЗ) от оборотов - m тактов того же таймера.

В этой работе хотел бы акцентировать внимание именно на одном из вариантов математической части такого алгоритма [7] и попытаться его модифицировать. Автором описывается построение одноканальной МПСЗ на базе платы DigiSpark для оппозитного двигателя. ФУОЗ реализует линейную интерполяцию УОЗ от скорости вращения маховика между табличными парами значений заданного УОЗ и скорости вращения маховика.

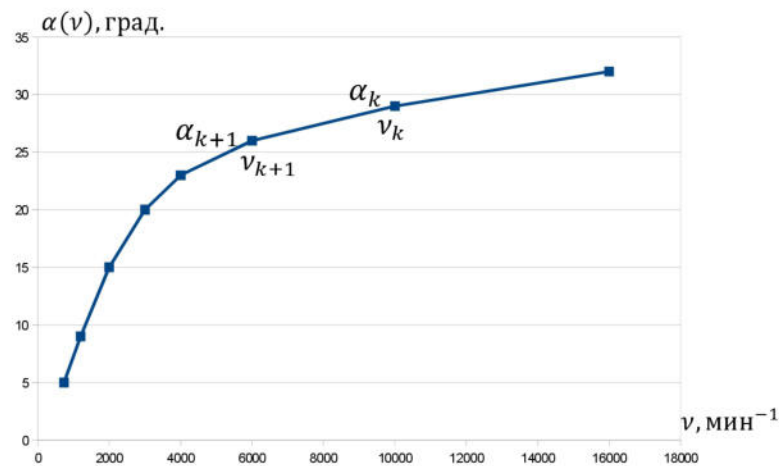


Рис.1 Зависимость УОЗ от скорости оборотов

На этапе подготовки программы кривая зависимости УОЗ $\alpha(v)$ разбивается на интервалы произвольной ширины по скорости вращения маховика v (Рис.1). Интервалы примыкают друг к другу. На каждом интервале рассчитываются параметры линейной интерполяции кривой УОЗ:

$$\alpha(v) = a_k v + b_k, \quad v_k \geq v \geq v_{k+1} \quad \text{тогда} \quad a_k = \frac{\alpha_k - \alpha_{k+1}}{v_k - v_{k+1}}, \quad b_k = \alpha_k - a_k v_k.$$

Анализ открытого листинга программного кода, созданного в системе ArduinoIDE, позволяет восстановить порядок действия алгоритма ФУОЗ:

1. Получается оценка скорости вращения маховика в тактах измерительного таймера - n .
2. Вычисляются текущие обороты по формуле $v = C/n$, где C - константа временного масштаба устройства.
3. По полученному значению v определяется индекс k сравнением с таблицей диапазонов $v_k \dots v_{k+1}$.
4. Рассчитывается УОЗ по формуле $\alpha(v) = a_k v + b_k$. Нужные коэффициенты a_k и b_k выбираются из памяти МК.
5. Рассчитывается момент искрообразования (значение таймера m) как функция параметров $v, \alpha(v), C$ и угловой координаты места установки датчика на маховике (начала отсчета) - β градусов до 0 верхней мертвой точки (ВМТ) цилиндра.

Программная реализация шагов №№2-5 осуществлена на базе вычислений с плавающей запятой. Поскольку применяемый в МПСЗ МК осуществляет их с помощью программной эмуляции, построенный математический алгоритм очень сильно ограничен по скорости работы. Применительно к оппозитным двигателям тяжелых мотоциклов алгоритм вполне работоспособен. На профильном сайте «оппозитчиков» даже существует целая тема по этому варианту МПСЗ [8]. Реализация в многоцилиндровом варианте или на двигателях с более высокими оборотами выглядит весьма проблематичным.

Перед описанием модификации алгоритма [7] обсудим варианты начала отсчета для ФУОЗ - угловой координаты места установки датчика на маховике β . Рассматриваются два способа установки датчика. Во-первых, датчик может быть установлен достаточно далеко от ВМТ - $\beta > \alpha(v)$, $\forall v$ (для любых значений оборотов). В этом случае оценка момента искрообразования осуществляется на текущий оборот маховика. Во-вторых, датчик устанавливается вблизи ВМТ, при этом выполняется обратное неравенство $\alpha(v) \geq \beta$, $\forall v$. Во втором случае оценка момента искрообразования производится на следующий период вращения. Нюансы выбор способа установки одиночного датчика в данной работе не рассматривается.

Для обеспечения поддержки работы алгоритма на многоцилиндровом двигателе с последовательным применением ФУОЗ от цилиндра к цилиндру введем параметр q . При $q=1$ получается ситуация одноцилиндрового двигателя. Если есть два цилиндра, то $q=2$. За один оборот маховика в этом случае должно быть две отметки времени n . Двух цилиндровый режим можно осуществить в одноканальном варианте, когда один датчик выдает два сигнала за оборот двигателя, а ФУОЗ формирует искру в двух цилиндрах одновременно. Двухканальный режим (раздельное искрообразование по цилиндрам) подразумевает или установку двух датчиков, разнесенных на 180 градусов, или использование датчика одноканального режима с дополнительной установкой второго датчика, позволяющего разделить номер цилиндра.

Рассмотрим первый вариант определения начала отсчета. Выражение для вычисления УОЗ на k интервале (в диапазоне оборотов $v_{k+1} \dots v_k$) имеет вид:

$$\alpha(v_{k+1} \leq v \leq v_k) = \frac{\alpha_k - \alpha_{k+1}}{v_k - v_{k+1}} v + \alpha_k - \frac{\alpha_k - \alpha_{k+1}}{v_k - v_{k+1}} v_k$$

Перейдем от физических оборотов v к эквивалентным им отсчетам измерительного таймера n :

$$v = \frac{C}{n},$$

где C - константа временного масштаба устройства:

$$C = \frac{60000000}{q} \cdot F,$$

F – частота тактового генератора измерительного таймера в МГц:

$$\alpha(n_{k+1} \geq n \geq n_k) = \frac{\alpha_k - \alpha_{k+1}}{\frac{C}{n_k} - \frac{C}{n_{k+1}}} \frac{C}{n} + \alpha_k - \frac{\alpha_k - \alpha_{k+1}}{\frac{C}{n_k} - \frac{C}{n_{k+1}}} \frac{C}{n_k} = \frac{\alpha_k - \alpha_{k+1}}{n_{k+1} - n_k} \frac{n_k n_{k+1}}{n} + \alpha_k - \frac{\alpha_k - \alpha_{k+1}}{n_{k+1} - n_k}.$$

Тогда

$$\alpha(n_{k+1} \geq n \geq n_k) = \frac{\alpha_k - \alpha_{k+1}}{n_{k+1} - n_k} \frac{n_k n_{k+1}}{n} + \frac{\alpha_{k+1} n_{k+1} - \alpha_k n_k}{n_{k+1} - n_k} \quad (1)$$

Обращаем внимание на то, что константа временного масштаба устройства более не нужна на этапе работы ФУОЗ. Она будет нужна только на стадии подготовки программы (расчет констант). Также отпала необходимость в расчёте текущих оборотов силами МК, поскольку формула интерполяции уже их не содержит. В свою очередь индексацию (определение номера диапазона k) можно производить сразу по сетке n_k .

Отсчетам таймера n будет соответствовать угол поворота маховика $\frac{360}{q}$. Выражение для показаний таймера m для искомого момента времени, соответствующему моменту зажигания на заданном углу $\alpha(n_{k+1} \leq n \leq n_k)$ от ВМТ будет иметь вид:

$$m = \frac{q}{360} [\beta - \alpha(n_{k+1} \leq n \leq n_k)] n \quad (2)$$

Подставим (1) в (2):

$$m = \frac{q}{360} \left(\beta - \frac{\alpha_k - \alpha_{k+1}}{n_{k+1} - n_k} \frac{n_k n_{k+1}}{n} - \frac{\alpha_{k+1} n_{k+1} - \alpha_k n_k}{n_{k+1} - n_k} \right) n$$

$$m = \frac{q}{360} \left(\left[\beta - \frac{\alpha_{k+1} n_{k+1} - \alpha_k n_k}{n_{k+1} - n_k} \right] n - \frac{\alpha_k - \alpha_{k+1}}{n_{k+1} - n_k} n_k n_{k+1} \right) = A_k n + B_k,$$

то есть

$$m = A_k n + B_k$$

$$A_k = \frac{q}{360} \left[\beta - \frac{\alpha_{k+1} n_{k+1} - \alpha_k n_k}{n_{k+1} - n_k} \right] \quad B_k = \frac{q}{360} \frac{\alpha_{k+1} - \alpha_k}{n_{k+1} - n_k} n_k n_{k+1}$$

Можно показать, что для второго случая, при котором датчик установлен вблизи ВМТ, итоговое выражение для m будет отличаться дополнительным слагаемым n .

Таким образом получим выражение:

$$m = \begin{cases} A_k n + B_k, & \text{если } \beta > \alpha(v), \forall v \\ A_k n + B_k + n & \text{если } \alpha(v) \geq \beta, \forall v \end{cases} \quad (3)$$

$$A_k = \frac{q}{360} \left[\beta - \frac{\alpha_{k+1} n_{k+1} - \alpha_k n_k}{n_{k+1} - n_k} \right] \quad B_k = \frac{q}{360} \frac{\alpha_{k+1} - \alpha_k}{n_{k+1} - n_k} n_k n_{k+1}$$

Так же как и оригинальный алгоритм, модифицированный алгоритм требует на этапе подготовки программы предварительного табулирования параметров. Необходимо сгенерировать таблицу индексации n_k , по которой на первом шаге модифицированного алгоритма следует определить номер диапазона k . Кроме того, после формирования таблицы индексов следует сформировать в памяти МК набор констант A_k и B_k .

Во время работы программы МК после получение оценки скорости вращения маховика от таймера n определяется индекс k и производится выборка из памяти МК констант A_k и B_k . После того сразу вычисляется искомое значение таймера m (момент зажигания) по формуле (3) с помощью одного умножения и одного сложения. Все промежуточные вычисления уже проводить не надо.

На этом можно было бы и остановиться. Однако анализ выражений для коэффициентов A_k , B_k и результаты численного моделирования с разумными по величине параметрами системы в целом, указывают на возможность проведения ещё нескольких шагов по упрощению. Во-первых, искомая величина m является целым числом. Пренебрежение дробной частью двух его составляющих даст максимальную ошибку порядка 2, что пренебрежимо мало по сравнению с характерными её значениями ($m \sim 100 \dots 10000$). Следовательно, можно пренебречь дробной частью B_k . Во-вторых, коэффициенты A_k меньше 1 в силу способов определения начала отсчета. В этой связи, удобно произведение $A_k n$, записать по иному:

$$A_k n = A_k 2^P n \frac{1}{2^P}, \quad (4)$$

где P – любое целое число порядка $12 \dots 16$. В частности, удобно принять $P=15$. Введем новые целые коэффициенты A_k^0 и B_k^0 – целые числа в диапазоне $-32768 \dots 32767$. Тогда расчетные выражения (3) принимают удобный для практической реализации на любом МК вид:

$$m = \begin{cases} [A_k^0 n] \text{ shr } 15 + B_k^0, & \text{если } \beta > \alpha(v), \forall v \\ [A_k^0 n] \text{ shr } 15 + B_k^0 + n & \text{если } \alpha(v) \geq \beta, \forall v \end{cases} \quad (5)$$

$$A_k^0 = \text{round} \left\{ \frac{q}{360} 32768 \left[\beta - \frac{\alpha_{k+1} n_{k+1} - \alpha_k n_k}{n_{k+1} - n_k} \right] \right\} \quad B_k^0 = \text{round} \left\{ \frac{q}{360} \frac{\alpha_{k+1} - \alpha_k}{n_{k+1} - n_k} n_k n_{k+1} \right\}$$

Здесь «round» – функция округления до целого, а «shr 15» – операция сдвига результата умножения двух целых чисел вправо на 15 бит (поделить на 32768)

Таким образом, все вычисления были переведены в область целых чисел – знаковое умножение 16 разрядной константы с положительным целым числом n и сложение с 16 разрядным целым числом со знаком. Надо лишь при подготовке программы для МК контролировать соотношение входных параметров для обеспечения диапазона получаемых целых коэффициентов. Последнее достигается достаточно большим шагом по сетке n_k (разность $n_{k+1} - n_k$ не должна быть малой).

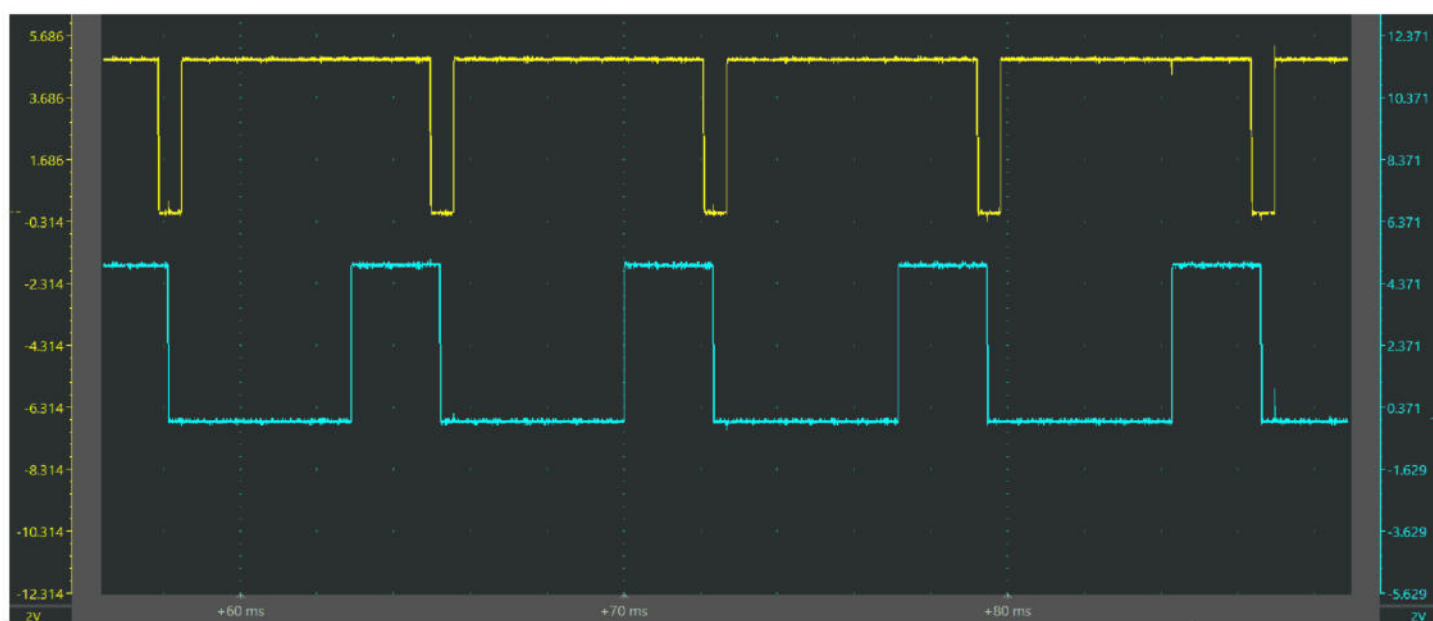
Описанный модифицированный метод был реализован на языке ассемблер и апробирован при создании лабораторного прототипа (действующая модель) МПЗС для одноцилиндрового двигателя с ТСИ зажиганием на базе платы Arduino Nano. Результаты предварительного моделирования и расчета коэффициентов сведены в Таблице 1. Значение параметров: $\beta = 40$ град., $q = 1$, $P = 15$, $C = 48000000$, время заряда катушки зажигания 2.3 мс. На рис.1 представлен график УОЗ, использованный на действующей модели МПЗС.

Время выполнения расчетной части алгоритма ФУОЗ при частоте кварца 16МГц составило от 2 до 14 мкс. Больше время соответствует большему индексу k . Такой зависимости не избежать из-за временных затрат на работу алгоритма поиска индекса методом сравнения с табличными значениями.

На рис.2 представлены осциллограммы, иллюстрирующие работу ФУОЗ на оборотах двигателя в районе 8400 мин^{-1} . Желтый луч – сигнал от датчика маховика. Спаду сигнала соответствует момент времени, когда маховик находится за 40 градусов до ВМТ. Фронту сигнала соответствует момент 10 градусов до ВМТ. Голубой луч – сигнал на ключевой транзистор для управления катушкой зажигания. Фронт сигнала соответствует началу заряда катушки, спад – момент искрообразования.

Таблица 1.

$v_k, \text{мин}^{-1}$	n_k	$\alpha_k, \text{град.}$	k	B_k	A_k	Расчет m по формуле (3)	B_k^0	A_k^0	Расчет m по формуле (5)
732	65536	5	-	-	-	-	-	-	-
1200	40000	9	7	1140,63	0,1146	3444	-1141	3756	3443
2000	24000	15	6	1000,00	0,1111	1667	-1000	3641	1666
3000	16000	20	5	-666,67	0,0972	889	-667	3186	888
4000	12000	23	4	-400,00	0,0806	567	-400	2640	566
6000	8000	26	3	-200,00	0,0639	311	-200	2094	311
8400	5714	?	2			$\text{int}(\frac{5714 \times 1684}{32768}) - 100 =$			193
10000	4800	29	2	-100,00	0,0514	147	-100	1684	146
16000	3000	32	1	-66,67	0,0444	67	-67	1456	66

Рис.2 Осциллограмма работы ФУОЗ на оборотах двигателя 8400 мин⁻¹.

Результат измерения УОЗ по осциллограмме (в программном комплексе осциллографа) ~ 27,6 градусов. Зеленым цветом в таблице 1 отмечена строка с расчетом для частоты вращения двигателя 8400 мин⁻¹. Форма (5) предсказывает задержку в 193 такта таймера. Таким образом, реальный УОЗ составит

$\beta - \frac{360 m}{5714} = 40 - \frac{360 \times 193}{5714} = 27,8$. Учитывая точность проводимых оценок, считаем результат достигнутым.

Гринев Сергей Николаевич

Ссылки:

1. <https://moto-fuoz.ru/>
2. <https://secu-3.org>
3. <https://radiokot.ru/forum/viewtopic.php?f=43&t=173631>
4. <https://radiokot.ru/forum/viewtopic.php?f=43&t=118580>
5. <https://radiokot.ru/forum/viewtopic.php?f=43&t=168358>
6. <https://radiokot.ru/forum/viewtopic.php?f=43&t=175701>
7. <https://customcult.netlify.app/>
8. https://opposit.ru/post_105869.html

10.11.2022 г.