

УДК 621.43.047.3

С. В. ЛОЗНЯ, С. А. ПУСТОВОЙ

ООО «Котрис», Киев, Украина

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ДВС С ИСКРОВОМ ЗАЖИГАНИЕМ

Представлены результаты аппроксимации экспериментальных данных по динамике индикаторного давления двигателей внутреннего сгорания (ДВС) при изменении загрузки, расхода топлива и углов опережения зажигания. Полученные результаты обобщены в виде математической модели динамики газового моторного компрессора и реализованы на базе программируемой логической интегральной микросхемы (ПЛИС) платформы ContrastRIO производства фирмы NI (США). С помощью разработанных аппаратно-программных средств выявлены недостатки и сформулированы требования к быстрому воздействию исполнительного механизма управления подачей топлива.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания; система зажигания; угол опережения зажигания; топливный регулирующий клапан, газовый моторный компрессор; индикаторные диаграммы.

Актуальность темы и состояние вопроса

Одним из направлений повышения экономичности двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является повышение эффективности работы их системы зажигания ДВС за счет оптимизации углов опережения зажигания (УОЗ).

Оптимальные УОЗ на ДВС по современным представлениям требуют соблюдения следующих критериев:

- максимальный крутящий момент (МКМ);
- максимальная удаленность от границы детонации;
- минимальные выбросы NOx.

Следует учесть также, что критерии детонации и повышенных выбросов NOx критичны в районе полной мощности ДВС. Поэтому на режимах частичной загрузки оптимальность УОЗ полностью сводится к МКМ.

Практически все современные ДВС сегодня используют разомкнутые, предварительно откалиброванные схемы управления УОЗ по параметрам, влияющим на оптимальность УОЗ, компенсируя это влияние. Калибровка предполагает достаточно интенсивное тестирование на этапе разработки двигателя с целью формирования таблиц – Look-Up Tables (LUT), определяющих изменение УОЗ по контролируемым параметрам. В связи с этим, увеличение числа контролируемых параметров оказывается порой не столько дорогим удовольствием, сколько нереализуемым с точки зрения технической невозможности калибровки. Поэтому число параметров ограничивают оборотами, нагрузкой, темпе-

ратурой рубашки охлаждения, температурой воздуха на впуске и др. При таком подходе калибровка не может служить цели достижения оптимальности УОЗ. Фактически при калибровке обеспечивают отсутствие детонации и приемлемые выбросы NOx во всем диапазоне изменения неконтролируемых параметров. Пример полученного таким образом поля изменения УОЗ по 2-м параметрам для автомобильного ДВС представлен на рис. 1 [1].

Для мощных ДВС, например, в приводе газовых моторных компрессоров (ГМК), указанные причины приводят к тому, что разработчик либо вообще не предусматривает изменение УОЗ на режимах загрузки (например, ГМК типа 10ГКН, МК-8), либо рекомендует изменять УОЗ только от давления наддува (ГМК типа МК-8М) и то, потому что иначе пуск холодного ГМК данного типа не возможен. На остановленном агрегате УОЗ устанавливается в верхнюю мертвую точку (ВМТ).

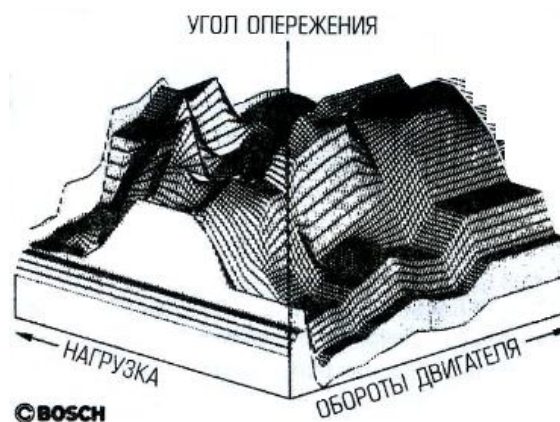


Рис. 1. Поле изменения УОЗ по 2-м параметрам для автомобильного ДВС

Нужно также учесть, что ГМК работают в основном на обеспечение буферного подземного хранения газа и львиная доля эксплуатации производится именно на режимы частичной загрузки. Поэтому нет ничего удивительного, что оптимальный УОЗ на таких режимах достаточно далек от штатного. Об этом явно свидетельствует увеличение оборотов ГМК при неизменном положении топливного регулирующего крана (ТРК) на режиме частичной загрузки ГМК типа МК-8, как видно из зависимости, представленной на рис. 2 (получена авторами в рамках данного исследования).

Цели:

- построение замкнутой системы управления УОЗ;
- определение условий оптимальности УОЗ;
- оценка фактического угла воспламенения;
- компенсация динамического запаздывания ТРК при поддержании оборотов;
- исключение аварий по оборотам при загрузке и разгрузке ГМК.

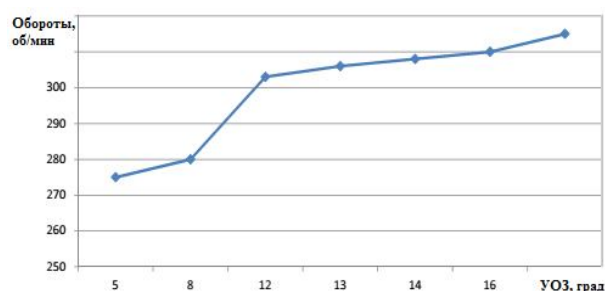


Рис. 2. Зависимость частоты вращения ГМК типа МК-8 от УОЗ при неизменном положении ТРК

Концепция решения

Основной подход к достижению поставленных выше целей может быть ориентирован на аппроксимацию экспериментальных данных по индикаторному давлению, оборотам, загрузке с получением модели реального времени, отражающей динамику изменения индикаторного давления, крутящего момента и оборотов ГМК в зависимости от загрузки, управляющего сигнала на ТРК и УОЗ.

Наличие подобной модели даст возможность реализовать системы управления расходом топливного газа и УОЗ, обеспечивающие требуемую динамику регулирования и оптимальные характеристики двигателя по экономичности.

Полученная замкнутая система управления на базе модели двигателя может быть реализована на базе быстродействующих контроллеров и привязываться в реальном времени к состоянию ГМК, компенсируя ошибки измеренных и модельных параметров, воздействуя на неконтролируемые состояния модели.

Изложение основного материала

Замкнутые системы управления УОЗ в отличие от разомкнутых принципиально гарантируют оптимальность УОЗ во всем диапазоне изменения условий и поэтому потенциально более привлекательны. При этом нет нужды в сложных калибровках при разработке двигателя. Но для реализации замкнутой системы управления УОЗ необходимо решить две задачи:

- определить условия оптимальности УОЗ;
- иметь обратную связь, т.е. возможность измерить фактический угол зажигания.

Оптимальность УОЗ достаточно полно определяется индикаторной диаграммой рабочего давления в цилиндре, напрямую влияющей на крутящий момент цилиндра.

Кроме информации об оптимальности УОЗ индикаторная диаграмма несет определенную информацию и о процессе горения, а значит и о самом угле зажигания. Но эта информация представлена не в явном виде. Помимо УОЗ форму индикаторной диаграммы определяют изменения объема цилиндра, потери тепла на теплопередачу, утечки и перетекания в цилиндре. Поэтому индикаторное давление приходится подвергать анализу на математической модели или вычислять значение критерия, отражающего чистое влияние УОЗ. Современные модели индикаторного давления даже на базе однозонной теории горения дают возможность воспроизвести измеренное давление с погрешностями порядка $0,2 \text{ кг/см}^2$. Наиболее распространенными критериями оптимальности индикаторной диаграммы, используемыми для определения оптимальности УОЗ на одном из ДВС, являются следующие:

- положение коленвала (ПКВ) пика индикаторной диаграммы давления;
- ПКВ 45% выгорания топлива;
- ПКВ максимума отношения индикаторного давления к моторному (давления сжатия);
- ПКВ максимального темпа роста индикаторного давления.

Принцип управления замкнутой системой, таким образом, должен состоять в поддержании УОЗ в зависимости от нагрузки ДВС, чтобы максимизировать крутящий момент. Для получения информации о крутящем моменте могут быть применены процедуры самонастройки по ошибке контролируемых параметров.

Математическая реализация модели динамики ГМК

Реализованная модель динамики ГМК включает следующие модули и предполагает расчет сле-

дующих параметров:

- процессор углов, рассчитывающий угловое ПКВ от ВМТ цилиндра в диапазоне 0.. 360 по углу поворота за такт цикла с периодом 5 мкс;
- углы опережения зажигания, углы ПКВ и наличие пламени по цилиндрам;
- давление сжатия по цилиндрам исходя из экспериментальной индикаторной диаграммы;
- давление сгорания в цилиндре по углу ПКВ, расходу топливного газа и давлению сжатия;
- крутящий момент по рабочему давлению и ПКВ цилиндра;
- избыточный крутящий момент и обороты исходя из момента инерции маховика;
- частоты собственных акустических колебаний цилиндра и выходные сигналы датчиков индикаторного давления и детонации.

Порядок реализации рассмотрим на примере модели рабочего давления в цилиндре с использованием индикаторных диаграмм, снятых на ГМК типа МК-8 (рис. 3).

На рисунке 4 приведены результаты оцифровки индикаторной диаграммы абсолютного рабочего давления P_{ia} в области расширения объема цилиндра. Здесь же приведены зависимости моторного давления P_{ma} и приращения dP_b рабочего давления в цилиндре над моторным давлением по ПКВ.

Исходя из полученной формы диаграммы dP_b приращения рабочего давления, очевидно, что сгорание топлива закончилось не позднее 206° ПКВ от нижней мертвой точки (НМТ).

Зависимость приращения рабочего давления от давления сжатия с этого момента представляет собой аппроксимацию процесса расширения продуктов сгорания при полностью сгоревшем топливе.

Для аппроксимации зависимости приращения давления сгорания при полностью сгоревшем топливе от моторного давления в цилиндре на диапазон углов до ВМТ использовались экспериментальные данные индикаторного давления при углах опережения зажигания 18° до ВМТ, при котором сгорание происходит в зоне ВМТ, достигая максимального уровня рабочего давления в цилиндре при неизменной подаче топливного газа.

Из экспериментальных данных получено, что максимальный пик давления при горении в районе ВМТ не превышает 44 кг/см^2 .

Для реализации указанного условия диаграмма приращения рабочего давления продлена до ВМТ, что соответствует моторному давлению 24 кг/см^2 и сглажена с выходом на полученный в эксперименте уровень приращения давления в момент ВМТ. Эта зависимость соответствует расходу топливного газа, соответствующего режиму работы ГМК в момент снятия индикаторной диаграммы (рис. 5).

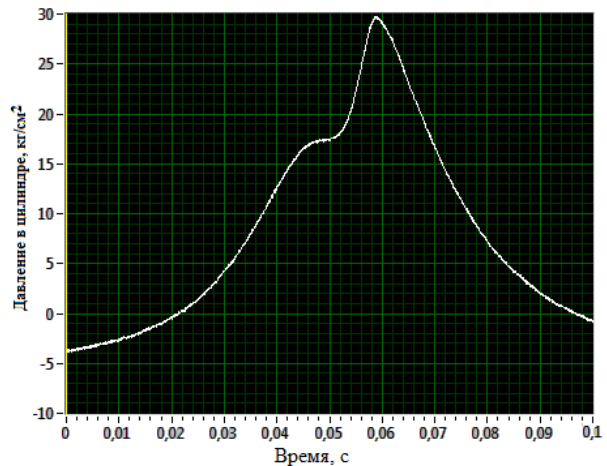


Рис. 3. Индикаторная диаграмма ГМК типа МК-8

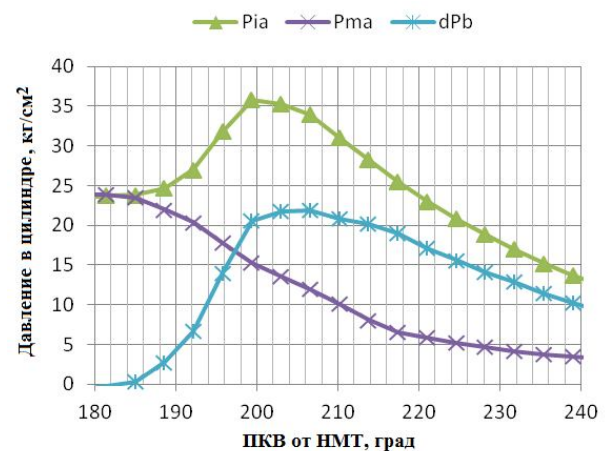


Рис. 4. Результаты оцифровки индикаторной диаграммы

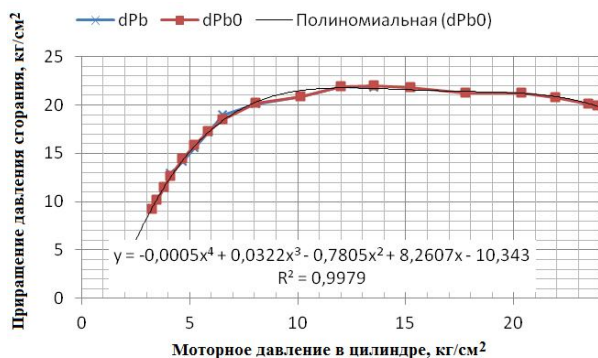


Рис. 5. Приращение давления сгорания при полностью сгоревшем топливе в зависимости от моторного давления в цилиндре

Для моделирования процесса расширения при расходе топлива отличном от данного достаточно отмасштабировать полученную зависимость по относительной подаче топлива, используя, например, условия адиабатного рабочего процесса.

Аппроксимация полученной зависимости полино-

мом 4-го порядка обеспечивает погрешность в области углов ПКВ от 0 до 70 гр за ВМТ не выше 0,2% (рис. 5).

На базе полученной аппроксимации зависимости, описывающей процесс расширения газа, легко предсказать рабочее давление P_{bm} при мгновенном выгорании топлива вплоть до момента воспламенения или до ВМТ (рис. 6).

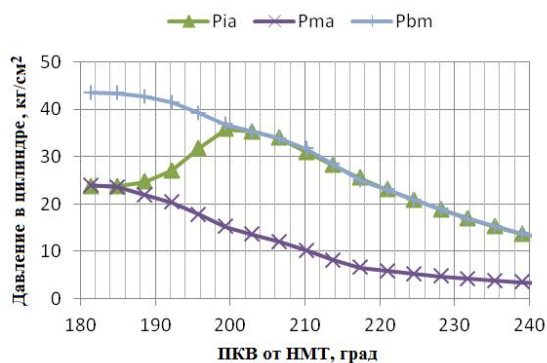


Рис. 6. Аппроксимация рабочего давления при мгновенном сгорании топлива до ВМТ

Используя в качестве базового полученное выше прогнозное значение рабочего давления, можно получить относительную массу несгоревшего топлива μ в цилиндре как отношение перепада между рабочим и давлением сжатия при мгновенном сгорании топлива и при фактической скорости горения (рис. 7).

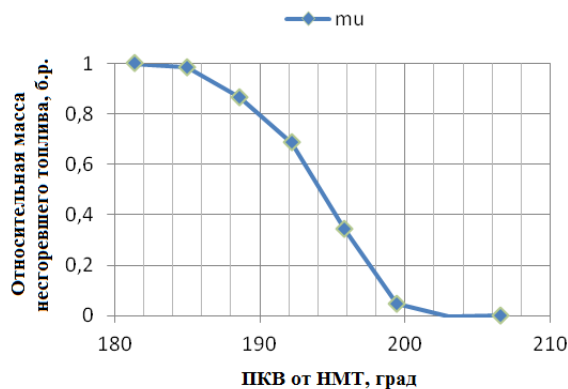


Рис. 7. Относительная масса несгоревшего топлива

Из полученной относительной массы несгоревшего топлива μ объемная скорость V_f выгорания топлива в цилиндре определяется как скорость убывания массы несгоревшего топлива и представляется в виде зависимости от текущей относительной массы несгоревшего топлива. Аппроксимация данной зависимости полиномом 3-го порядка дает погрешность порядка 3% (рис. 8).

Алгоритм расчета рабочего индикаторного давления с учетом аппроксимированных зависимостей может быть следующим:

– определение прироста рабочего давления при полном мгновенном сгорании всего поданного топ-

лива (рис. 5);

– интегрирование относительной массы несгоревшего топлива с учетом зависимости объемной скорости выгорания (рис. 8);

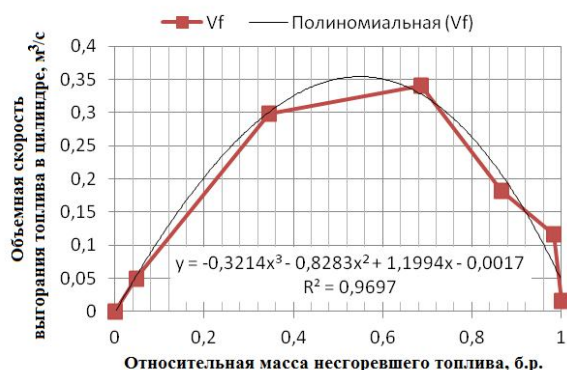


Рис. 8. Объемная скорость выгорания топлива в цилиндре

– определение текущей доли прироста рабочего давления в зависимости от текущей массы несгоревшего топлива;

– определение текущего рабочего давления как суммы текущего давления сжатия и текущего прироста рабочего давления.

Анализ данных, полученных при расчете по указанному алгоритму с использованием исходных давлений сжатия показывает, что ошибки моделирования рабочего давления по приведенному алгоритму не превышают 0,6 кг/см² (рис. 9).

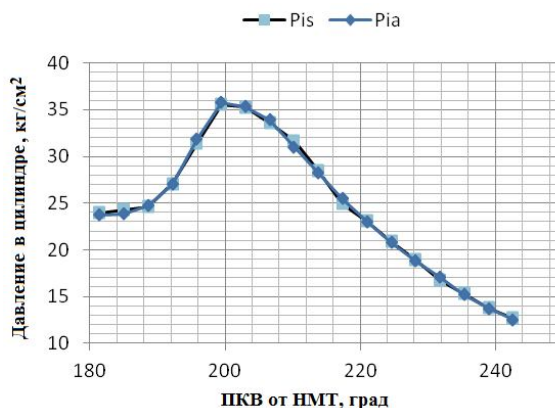


Рис. 9. Рабочее давление в цилиндре

Реализация указанного алгоритма в реальном времени на ПЛИС требует реализации двух табличных нелинейных зависимостей (2-х умножителей) и 16-битной целочисленной математики (рис. 10).

Аппаратная реализация модели динамики ГМК

Аппаратная реализация модели осуществлена на базе программируемой логической интегральной

микросхемы в составе платформы NI cRIO (рис.11), основанной на 46 тысячах логических вычислителей, работающих параллельно на частоте 40 МГц, что соответствует вычислительной мощности процессора, работающей на тактовой частоте 40 МГц*46 000 ячеек > 1000 ГГц.

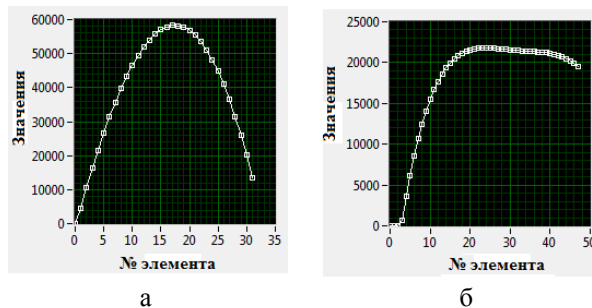


Рис. 10. Табличные нелинейные зависимости (Look-Up Tables) интерполяции:

а - доли dM топлива, выгоревшего за 5 мкс, в зависимости от текущей массы несгоревшего топлива m; б - расчетного приращения рабочего давления dP_{р0} над давлением сжатия в процессе при полном сгорании расчетного количества топлива M₀



Рис. 11. Аппаратная платформа для реализации имитатора ГМК: ПЛИС на платформе NI cRIO-9073

Реализация модели в составе имитатора ГМК потребовала использования до 65% мощности ПЛИС и 22-х умножителей с реализацией вычислений с разрешающей способностью до 64 бит.

Обмен информацией с внешней системой зажигания и регулятором оборотов осуществляется на частоте 125...143 кГц и 500 Гц соответственно.

Функциональные возможности реализованной модели:

- расчет по каждому из 8 цилиндров ГМК типа МК-8 с периодичностью 5 мкс (0,01 углового градуса ПКВ при частоте вращения 300 об/мин): индикаторного давления цилиндров, фактических УОЗ, относительной подачи топлива на такт, наличия пламени в цилиндре, фактического угла воспламенения топлива (рис. 12);

- обмен информацией с рабочей станцией оператора по цифровому каналу Ethernet с периодичностью 20 мс;

- вывод осциллограмм работы системы зажигания (формирование входных сигналов на имитацию работы датчиков оборотов и фазы и импульсов зажигания) с разрешением 0,5 углового градуса ПКВ при 300 об/мин (рис. 13).

По цилиндрам

Угол зажиг-я от НМТ 1	Угол воспл-ния	Угол зажиг-я от НМТ 2	Пик давления цилин-в	Топливо цилин-в	Пламя
170,914	190,016	170,914	23900	0	■
170,273	188,781	170,273	23900	0	■
170,812	189,82	170,812	23900	0	■
170,453	189,125	170,453	23900	0	■
170,578	189,375	170,578	23900	0	■
169,992	188,242	169,992	23900	0	■
171,047	190,266	171,047	23900	0	■
170,703	189,609	170,703	23900	0	■

Рис. 12. Элемент видеокadra панели рабочей станции оператора модели динамики ГМК

Пример применения реализованной модели динамики ГМК

Покажем возможности использования разработанного имитатора ГМК на примере обоснования требуемого быстродействия ТРК (рис. 14).

В процессе имитации сравнивались переходные процессы загрузки и разгрузки ГМК, соответствующие мгновенному повышению и снятию нагрузки с 532 Нм до 32 Нм для трех различных вариантов реализации ТРК:

- пневмоприводного ТРК KE-43 фирмы Spirax Sarco (время перекладки 2 с);
- соленоидного пропорционального ТРК Sentionic фирмы Emerson (время перекладки 400 мс);
- шагового ТРК 8402 фирмы АМОТ (время перекладки 250 мс).

Для оценки с помощью имитатора влияния быстродействия исполнительного механизма подачи топлива на возможность компенсации резкого изменения нагрузки при загрузке ГМК в трассу использовался регулятор топлива, представляющий зависимость требуемого тока управления ТРК для заданной нагрузки (нагрузочного крутящего момента), обратной нагрузочной характеристике двигателя (рис. 15).

Аварийная уставка по превышению оборотов для моделируемого ГМК составляет 330 об/мин, по снижению оборотов 250 об/мин. Период вывода данных на тренды составлял 20 мс.

На рисунке 16-17 представлены результаты моделирования при загрузке (а) и разгрузке (б) ГМК.

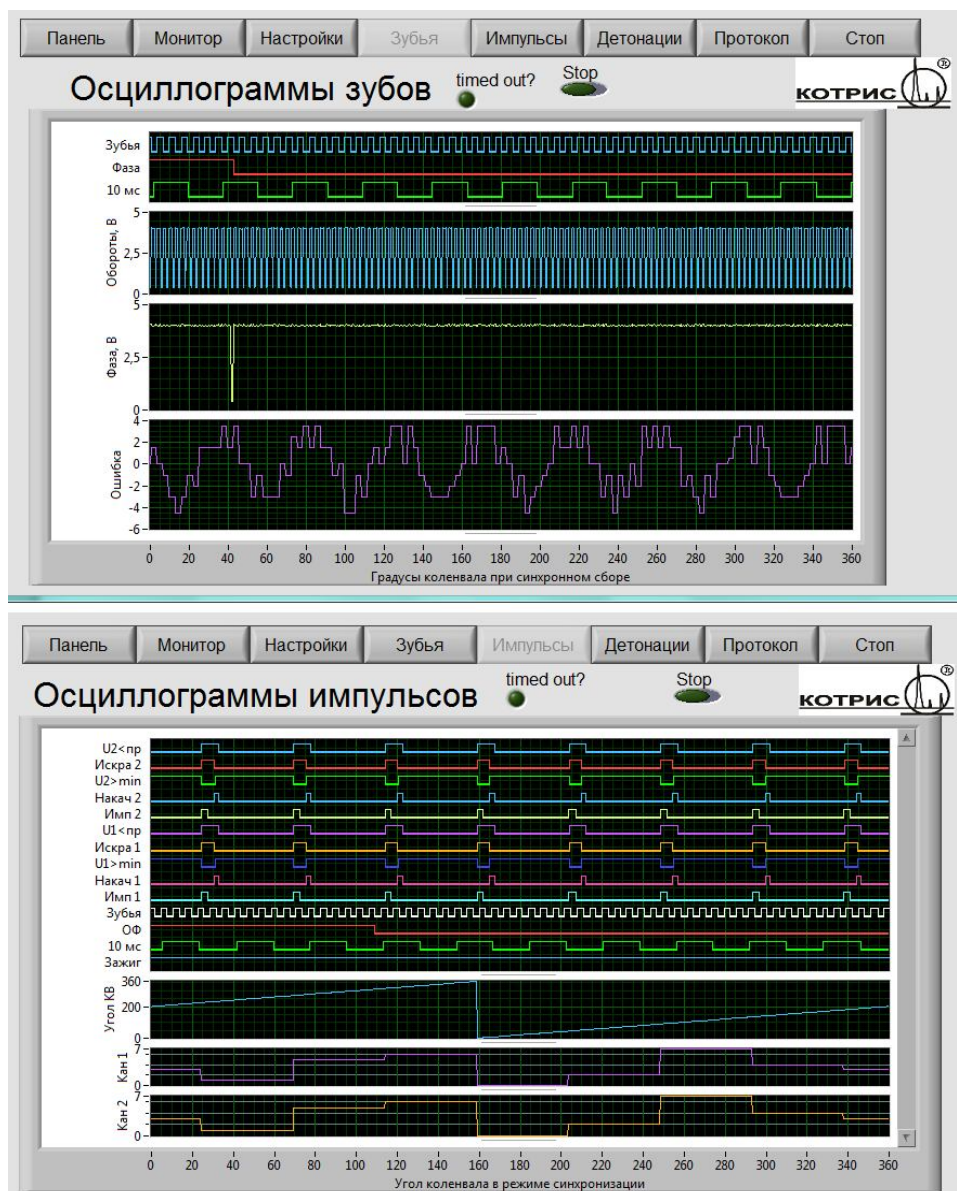


Рис. 13. Видеокадры осциллограмм входов и выходов системы зажигания рабочей станции оператора имитатора ГМК



Рис. 14. Осциллограммы крутящего момента и частоты вращения коленчатого вала ГМК в процессе имитации

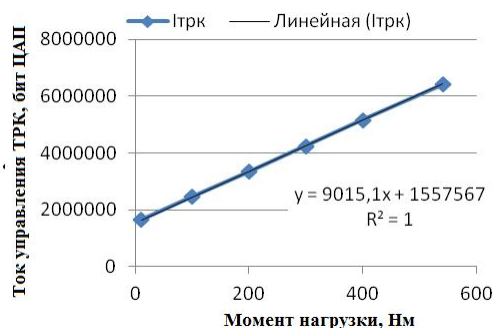
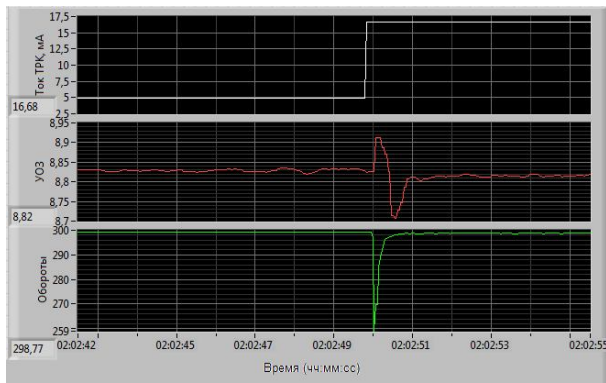
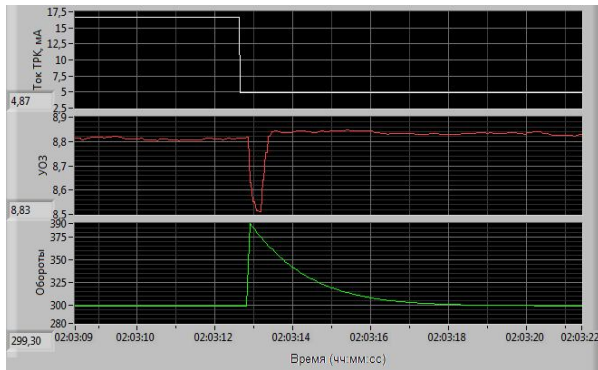


Рис. 15. Программа регулирования ТРК в полном соответствии с модельной нагрузочной характеристикой ГМК по топливу при фиксированных штатных 9 гр. УОЗ

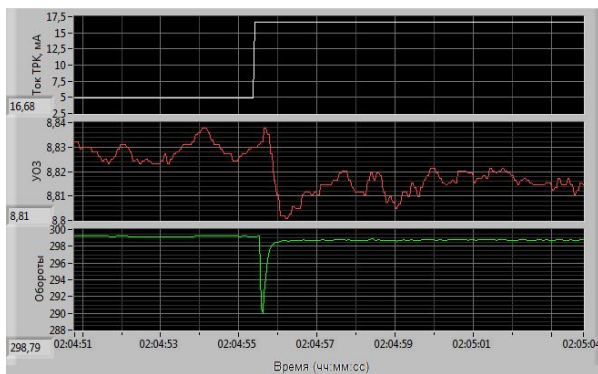


а

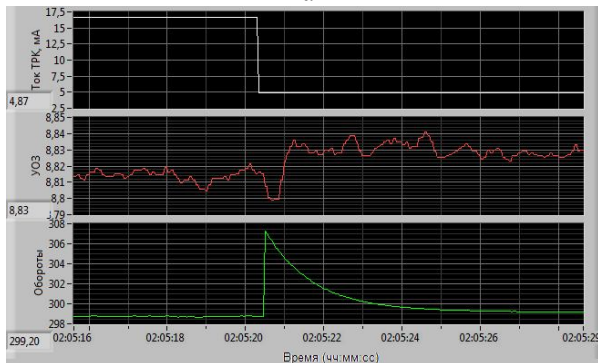


б

Рис. 16. Тренды изменения УОЗ и оборотов ГМК при использовании пневмоприводного ТРК KE-43 фирмы Spirax Sarco



а



б

Рис. 17. Тренды изменения УОЗ и оборотов ГМК при использовании шагового ТРК 8402 фирмы AMOT

Как видно из графиков рис. 16-17, а также из аналогичных результатов моделирования, нагрузка ГМК приводит к провалу оборотов коленвала:

- на 41 об/мин на время до 0,5 с (2 оборота коленвала) при использовании ТРК с временем переключения 2 с;

- на 13 об/мин на время до 0,5 с (2 оборота коленвала) при использовании ТРК с временем переключения 400 мс;

- на 9 об/мин на время до 0,5 с (2 оборота коленвала) при использовании ТРК с временем переключения 250 мс.

Соответственно, разгрузка ГМК приводит к забросу оборотов коленвала:

- на 90 об/мин на время до 4 с (20 оборотов коленвала) при использовании ТРК с временем переключения 2 с;

- на 19 об/мин на время до 3 с (15 оборотов коленвала) при использовании ТРК с временем переключения 400 мс;

- на 8 об/мин на время до 3 с (15 оборотов коленвала) при использовании ТРК с временем переключения 250 мс.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что при применении «медленного» ТРК KE-43 фирмы Spirax Sarco ГМК выходит на «верх» после провала практически за 1 оборот, тогда как сброс оборотов после превышения затягивается.

При сокращении времени переключения ТРК с 2 с до 400 мс (ТРК Sentronic фирмы Emerson) забросы оборотов снижаются не менее чем в четверо, обеспечивая возможность реализации безаварийных переходных процессов.

При применении ТРК Амот 8402 (темп переключения 250 мс), обеспечивается практически 10-кратное повышение скорости переключения по сравнению с пневмоприводным клапаном, величины ошибок регулирования также снижаются в 10 раз. При этом забросы и провалы при разгрузке и загрузке практически равны. Последний факт может служить обоснованием того, что снижение провалов при загрузке фактически связано с ограниченным периодом обновления данных на тренде (20 мс), практически равным периоду рабочих тактов цилиндров.

Выводы

1. Динамическая модель ДВС с шагом решения 0,01 градус ПКВ для 300 об/мин требует не более 30% ресурсов серийного ПЛИС и может быть реализована в состав систем зажигания и регулятора оборотов ДВС.

2. Для реализации регулятора оборотов ГМК типа МК-8 время переключения ТРК не должно быть выше 0,5 с.

3. Стандартный ПИД-регулятор не дает возможность реализовать приемлемое качество управления ДВС ввиду существенного расхождения потребных коэффициентов усиления регулятора для положительных и отрицательных рассогласований в замкнутом контуре управления.

4. Применение синхронных фильтров в канале измерения оборотов ГМК типа МК-8 с периодом усреднения равным периоду рабочих циклов цилин-

дров позволяет снизить ошибки регулирования оборотов до 3%.

Литература

1. Рэндалл М. *Электрическое и электронное оборудование автомобилей: Полное руководство для автолюбителя [Text] / М. Рэндалл. – СПб. : Альфамер Паблшинг. – 2012. – 284 с.*

Поступила в редакцию 2.06.2014, рассмотрена на редколлегии 17.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры А. В. Белогуб, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

АПАРАТНО-ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ ДЛЯ РОЗРОБКИ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ ДВС З ІСКРОВИМ ЗАПАЛЮВАННЯМ

С. В. Лозня, С. О. Пустовий

Представлено результати апроксимації експериментальних даних динаміки індикаторного тиску двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) при зміні навантаження, витрати палива та кутів випередження запалювання. Отримані результати узагальнено у вигляді математичної моделі динаміки ГМК та реалізовано на базі програмованої логічної інтегральної мікросхеми (ПЛІС) платформи CompactRIO виробництва фірми NI (США). За допомогою розроблених апаратно-програмних засобів виявлено недоліки та сформульовано вимоги до швидкодії виконавчого механізму керування витратою палива.

Ключові слова: двигун внутрішнього згорання; система запалювання; паливний регулюючий клапан, газовий моторний компресор; індикаторні діаграми.

HARDWARE AND SOFTWARE TOOLS FOR DESIGN AND OPTIMIZATION SPARK IGNITION INTERNAL COMBUSTION ENGINE

S. V. Loznya, S. O. Pustovyi

Based on field measurements approximation to compute of dynamic of in-cylinder pressure of internal combustion (IC) engine depend upon load, advanced ignition angle and fuel rate changes is presented. Results of approximation is taken in use for developing of integrated tool for real-time engine numeric modeling, that is based on integrated circuit of field programmable gate array (FPGA) inside on CompactRIO platform from National Instruments (USA). With help of developed tool it is performed the analysis, that allow to word the requirements for fuel valve response time for internal combustion engine speed control system.

Key words: IC-engine; ignition control system; fuel control valve; gas fired reciprocating compressor; in-cylinder pressure diagrams.

Лозня Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доцент, Главный инженер, ООО «Котрис», Киев, Украина, e-mail: lsv@kotris.ua.

Пустовой Сергей Алексеевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., начальник отдела программно-технического обеспечения, ООО «Котрис», Киев, e-mail: pustovoy@kotris.ua.