

POSSIBILITIES FOR OPTIMIZING PARAMETERS AFFECTING THE ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF A GASOLINE ENGINE ³

маг. инж. Христо Конакчиев
Технически Университет – София
E-mail: hkonakchiev@tu-sofia.bg

Abstract: This paper provides an analysis of the potential for parameter optimization in electronic process control systems for gasoline engines. The objective is to improve fuel economy and reduce harmful emissions such as nitrogen oxides (NOx), carbon monoxide (CO), unburned hydrocarbons (HC), etc. Specifically, the effect of ignition timing, air-fuel ratio (AFR) and exhaust gas recirculation (EGR) on engine efficiency and environmental performance is investigated. This quantifies the emission reductions and fuel efficiency improvements that are achievable through proper tuning of these parameters. Optimizing these factors enables compliance with stringent environmental standards, such as Euro 6, without compromising the dynamic performance of the engine.

Keywords: Optimization, Emissions, Environmental indicators, Emission Standards, Gasoline Engine

Резюме

Тази статия представя анализ на потенциала за оптимизация на параметрите в електронните системи за управление на процесите на двигателите с принудително възпламеняване. Целта е постигане на по-голяма икономията на гориво и намаляване на вредните емисии като: азотни оксиди (NOx), въглероден оксид (CO), неизгорели въглеводороди (HC) и др. По-конкретно се изследва влиянието на момента на запалване, съотношението въздух-гориво (AFR) и рецикулацията на отработените газове (EGR) върху ефективността на двигателя и екологичните показатели. Това определя намалението на количеството на вредните емисии и подобряването на горивната ефективност, които са постижими чрез правилната настройка на разгледаните параметри. Оптимизирането на тези фактори дава възможност за спазване на строгите екологични стандарти, като например Евро 6, без това да води до по-лошо динамично представяне на двигателя.

Въведение

Автомобилната индустрия е изправена пред нарастващ натиск, относно спазването на по-строги екологични регулации. Бензиновите двигатели са един от основните източници на замърсяване на въздуха, поради изпусканите вследствие на тяхната работа NOx, CO, HC и др. Въпреки напредъка в развитието на електрическите и хибридните превозни средства, бензиновите двигатели все още са широко разпространени, което налага оптимизация на техните системи за управление, за да отговорят на регулаторните изисквания. Това изследване се фокусира върху оптимизацията на ъгъла на запалване, гориво-въздушното отношение, рецикулацията на отработените газове, момент и налягане на впръскването на горивото, за да се намалят вредните емисии, без да се нарушава работата на двигателя.

Изложение

1. Фактори, влияещи на екологичните показатели и подходи за тяхната оптимизация

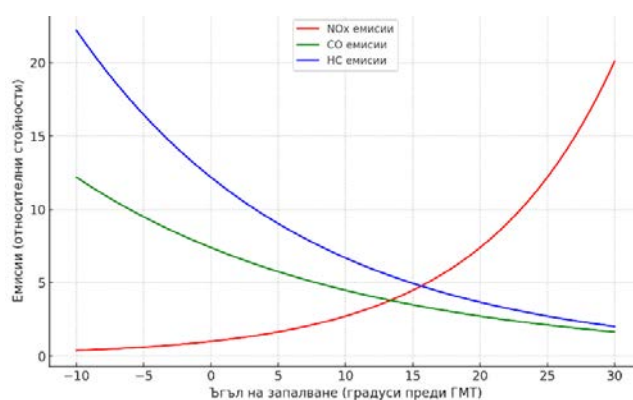
³ Докладът е представен на пленарната сесия на 25 октомври 2024г. с оригинално заглавие на български език: ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ОПТИМИЗИРАНЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ, ВЛИЯЕЩИ ВЪРХУ ЕКОЛОГИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА БЕНЗИНОВ ДВИГАТЕЛ

1.1 Ъгъл на запалване

Њгълът на запалване или по-точно казано, ъгъла на завъртане на коляновия вал, при който запалителната свещ, възпроизвежда искров заряд, контролира момента, в който гориво-въздушната смес се възпламенява в горивната камера. Изпреварването на запалването може да увеличи ефективността на горенето и да намали емисиите на CO и HC, но също така повишава температурата на горене, което води до по-високи емисии на NOx. Закъснението на запалването намалява NOx, но оказва негативно влияние върху CO, HC и горивната ефективност. Оптималният ъгъл на запалване е съвкупност от постигане на максимални динамични възможности при спазване на екологичните изисквания, между емисиите и работните характеристики на двигателя.

Връзката между ъгъла на запалване и налягането в цилиндъра:

$$P_{cylinder}(t) = \frac{mRT}{V(t)} \quad (1)$$



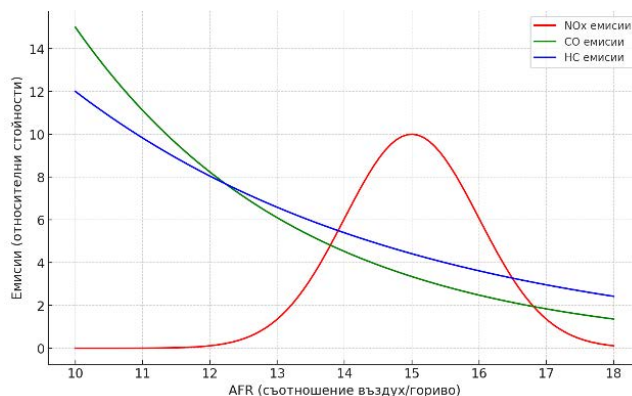
Графика 1 Влияние на ъгъла на запалване върху емисиите на NOx, CO и HC

1.2 Съотношение гориво-въздух (AFR или ГВО)

ГВО определя съотношението между въздуха и горивото по време на горене. Стехиометричното съотношение AFR от 14.7:1 е идеално за пълно изгаряне, но малки отклонения могат да оптимизират емисиите. При работа с бедна смес се намаляват CO и HC, но се увеличават емисиите на NOx, докато богата смес има обратен ефект. Оптимизирането на AFR е от ключово значение за поддържане на ниското ниво на емисиите. „Бедното“ ГВО може да подобри икономията на гориво и да намали емисиите на CO и HC, но увеличава нивата на NOx. Това проучване цели определянето на оптималното ГВО за минимизиране на всички замърсители, като същевременно се цели запазване на динамичните показатели на ДВГ.

AFR за горене на бензин:

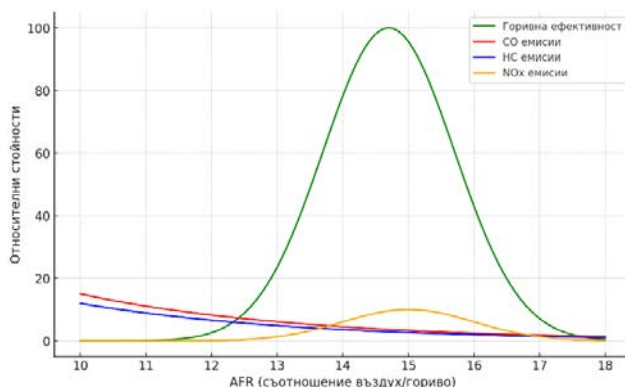
$$AFR = \frac{\text{маса на въздуха}}{\text{маса на горивото}} = 14.7 : 1 \quad (2)$$



Графика 2 Емисии на NO_x, CO и HC при различни стойности на AFR

Функция за икономия на гориво (FE) въз основа на AFR:

$$FE = \frac{\text{Work Output}}{\text{Fuel Input}} \quad (7)$$



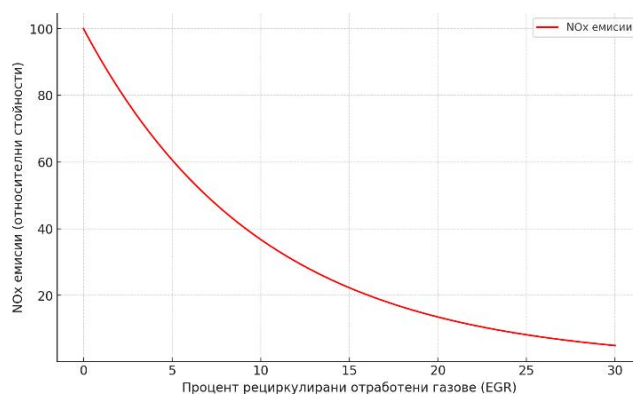
Графика 3 Връзка между горивната ефективност и AFR с наложени емисии на CO, HC и NO_x

1.3 Рециркулация на отработените газове (EGR)

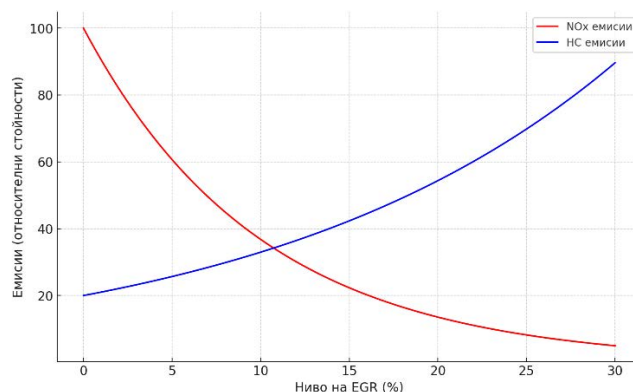
EGR представлява преминаване на отработени газове от изпускателния обратно към пълнителния тръбопровод, с цел намаляване на температурата на горене и намаляване на емисиите на NO_x, като понижава температурата на горене. Въпреки това, превишаването на определено съдържание на отработени газове, постъпващи в към горивната камера, може да причини нестабилност в горенето, водеща до повишени емисии на HC и намалена горивна ефективност. Това изследване разглежда оптималното количество на отработените газове в „прясната“ гориво-въздушна смес.

Ефективност на намаляване на NO_x в зависимост от нивото на EGR:

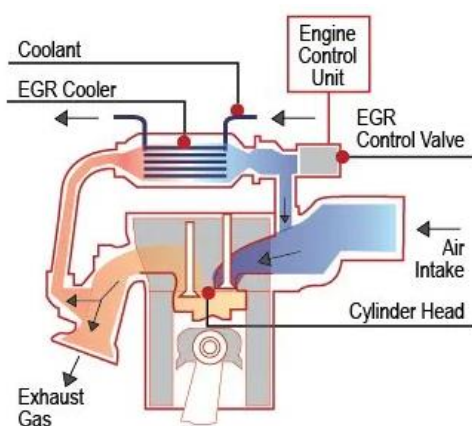
$$\eta_{NOx} = \frac{\Delta NOx}{\Delta EGR} \times 100 \quad (3)$$



Графика 4 Намаление на емисиите на NOx чрез рециркулиране на отработените газове



Графика 5 Влияние на различни нива на EGR върху емисиите на NOx и HC



Фигура 1 Схема на системата EGR в двигателя

1.4 Системи за последваща обработка на отработените газове

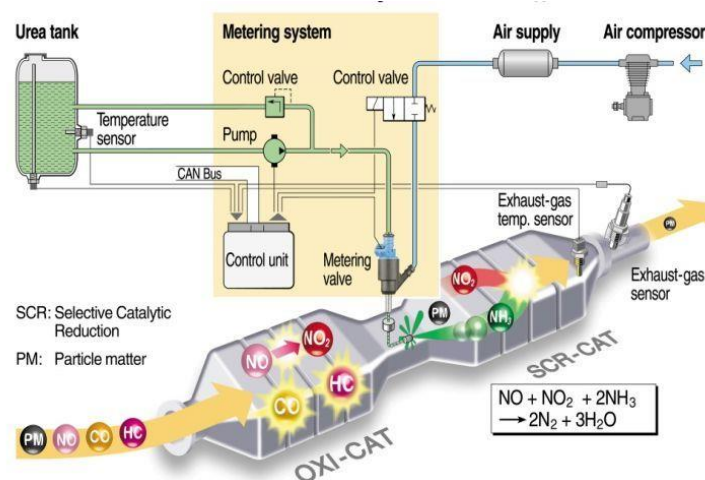
Системите за последваща обработка на отработените газове, като: катализатори, филтри за твърди частици и системи за селективна каталитична редукция (SCR), играят ключова роля в намаляването на емисиите след процеса на горене. Калибрирането на тези системи включва прецизен контрол на температурата на отработените газове, тъй като тя пряко влияе върху ефективността на катализаторите и циклите на регенерация.

Подход:

- **Калибриране на катализатора:** Правилното съотношение на горивната смес постъпваща в двигателя и поддържането на температурите на отработените газове в оптимален диапазон допринасят за по-висока ефективност на катализаторите, които

преобразуват вредните газове като CO, HC и NOx в по-малко вредни съединения като CO₂ и H₂O.

- **Оптимизация на филтрите за частици (DPF/GPF):** Определянето на циклите на регенерация и осигуряването на оптимално изгаряне на уловените във филтрите частици предотвратява тяхното запушване и поддържа ниски нива на твърди частици (PM).



Фигура 2 Диаграма на системата за последваща обработка на изгорелите газове

Температурата, необходима за оптимална ефективност на катализатора, като функция на ГВО и потока от отработени газове:

$$\eta_{cat} = f(T_{exhaust}, AFR) \quad (8)$$

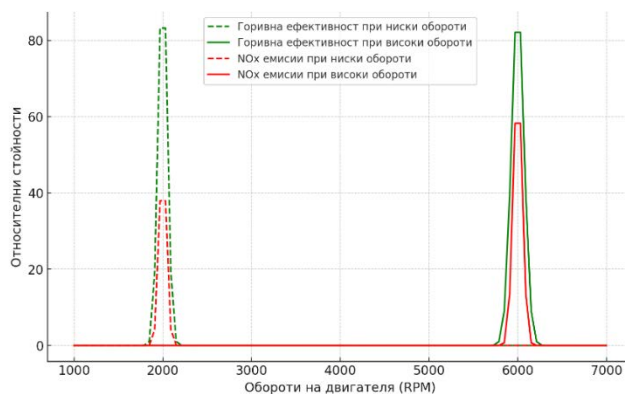
Където η_{cat} е КПД на катализатора, а $T_{exhaust}$ е температурата на отработените газове.

1.5 Променливо управление на клапаните (VVT)

Системите за променливо управление на клапаните (Variable Valve Timing), регулират момента на отваряне и затваряне на пълнителните и изпускателните клапани. Това подобрява ефективността на горенето, коефициента на пълнене, намалява разхода на гориво и намалява емисиите, особено на HC и CO. Модел на VVT:

$$\theta_v = f(RPM, Load) \quad (5)$$

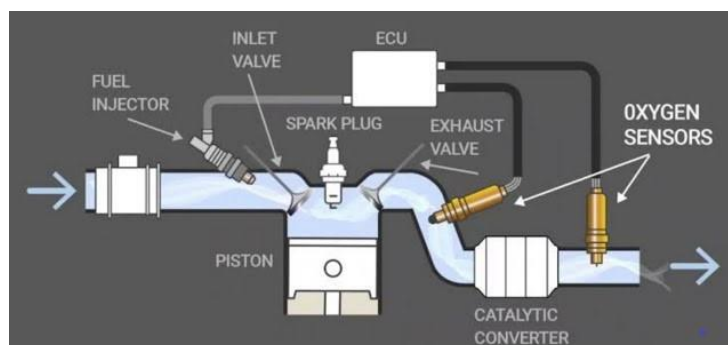
Където θ_v е ъгълът на клапаните, регулиран в зависимост от оборотите на двигателя и натоварването.



Графика 3 Въздействие на VVT системата върху горивната ефективност и емисиите

1.6. Обратна връзка от кислородния сензор (O2 сензор)

Кислородният сензор следи нивото на кислород в отработените газове и подава информация към ECU за корекция на ГВО. Изправният O2 сензор помага да се поддържа процесът на горене близо до стехиометричното съотношение, осигурявайки ниски емисии.

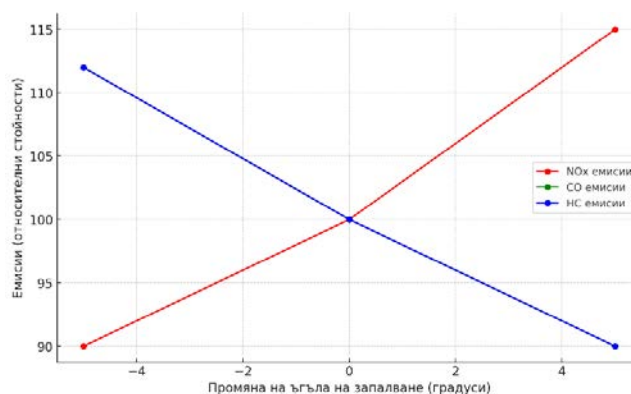


Фигура 3 Диаграма на разположението на кислородния сензор в изпускателната система и неговата обратна връзка

2. Резултати и дискусия

2.1 Теоретични изследвания от оптимизацията на ъгъла на запалване

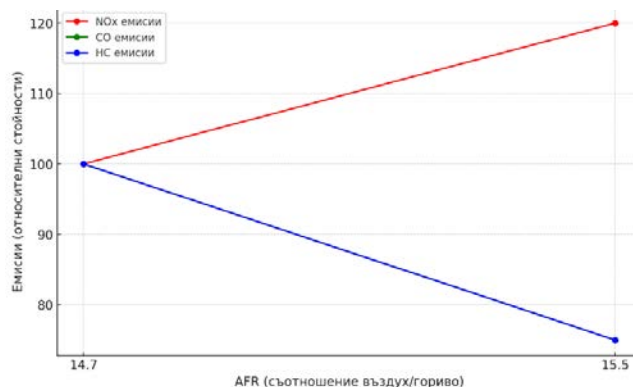
Изпреварване на запалването с 5° довежда до намаление на емисиите на CO и HC, но по-значително от това увеличава емисиите на NOx. Забавянето на запалването с 5° намалява емисиите на NOx, но за сметка на емисиите на CO и HC увеличавайки ги в сходен порядък, като същевременно това влияе и на влошаване на горивната ефективност. Резултатите по-долу показват, че настройването на ъгъла на запалване може значително да повлияе както на съдържанието на вредните емисии, така и на разхода на гориво, но е необходимо да се намери баланс, който минимизира NOx, без да се увеличават прекалено CO и HC или пък да влошава динамичното представяне на агрегата.



Графика 7 Теоретичен ъгъл на запалване спрямо емисиите на NOx, CO и HC

2.2 Теоретични резултати от оптимизацията на съотношението въздух-гориво (AFR)

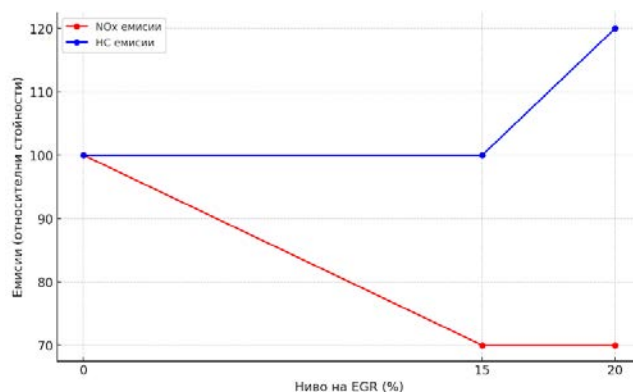
Работата с „бедна“ смес ГВО 15.5:1 намалява емисиите на CO и HC, но увеличава съдържанието на NOx. Стехиометричното съотношение от 14.7:1 предоставя добър баланс, минимизирайки емисиите, като същевременно подобрява горивната икономия. Леко бедна смес около 15:1 е може би дава оптимална горивната ефективност и емисиите на CO/HC, при ниски режими на натоварване на двигателя, като това отношение не бива да бъде увеличаване, тъй като това би довело до прекомерни нива на NOx.



Графика 8 Теоретични резултати за AFR спрямо емисиите на NOx, CO и HC

2.3 Резултати от настройването на количеството отработени газове постъпващи в пълнителния тръбопровод

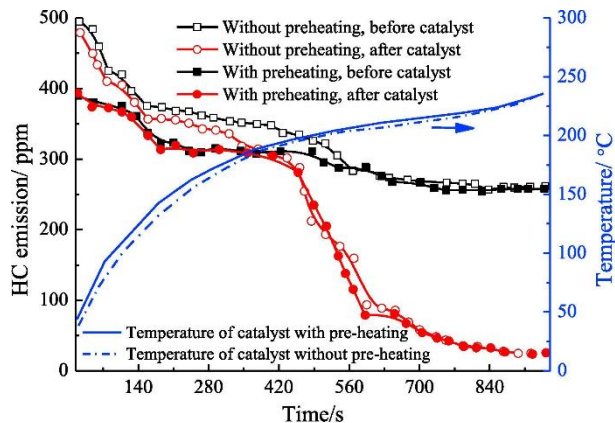
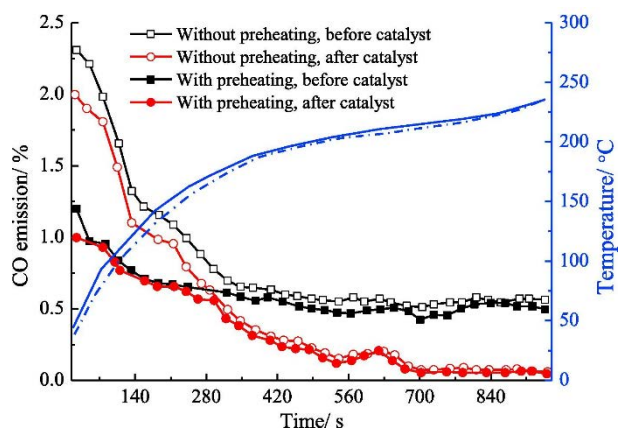
При нива от 15% от общото количество горивна смес, емисиите на NOx намаляват осезаемо без това да въздейства на представянето на двигателя, при установени режими на работа и слабо натоварване. Увеличаването на нивото на EGR до 20% предизвиква пропуски в запалването и увеличение на количеството на въглеводороди, което показва, че превишаването на този праг намалява ползите от системата. Данните потвърждават, че ниските нива на отработени газове са ефективни за намаляване на емисиите на NOx, без да носи никакви значителни негативи.



Графика 9 Теоретични резултати от настройването на нивото на EGR спрямо NOx и HC

2.4 Резултати от настройването на системата за последваща обработка на отработените газове

Оптимизирането на температурата на катализатора подобрява ефективността му при преобразуването на вредни газове. Поддържането на оптимална температура в каталитичните



конвертори, способства за тяхното най-добро представяне спомагащо за намаляване на емисиите на NO_x, CO и HC. Извън този диапазон ефективността на преобразуването значително спадна, което води до завишени нива на вредни емисии непосредствено след първоначален старт на двигателя.

3. Заключение

Това проучване именно показва, че значителни намаления на емисиите и подобрения в горивната ефективност могат да бъдат постигнати чрез оптимизация на ключови параметри при работата на бензиновите двигатели. Чрез внимателна настройка на ъгъла на запалване, гориво-въздушното отношение и рецикулацията на отработени газове наличието на вредни емисии. Използването на съвременни технологии като променливо управление на клапаните (VVT) допълнително подобрява горивния процес коригирайки периода на отделните тактове, а в някой случай дори и тяхната продължителност. В допълнение, поддържането на необходимата температура в каталитичните конвертори, допринася за достигане на максималния им коефициент на полезно действие, минимизирайки емисиите генерирани в резултат на горенето.

Резултатите потвърждават, че техники за оптимизация, базирани на настройване и калибриране на системите, могат да доведат до значителни подобрения в екологичните показатели на бензиновите двигатели, правейки ги по-съвместими с по-строги стандарти за емисии като Евро 6.

Източници:

- Heywood, J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill, 1988.
- Zhang, Y., et al. "Optimization of Ignition Timing and AFR for Gasoline Engines," *Journal of Engine Research*, , 2020.
- European Commission. "Euro 6 Emission Standards," *Official Journal of the European Union*, 2014.
- Jianbing Gao, Guohong Tian, Aldo Sornioti, Ahu Ece Karci, Raffaele Di Palo "Review of thermal management of catalytic converters to decrease engine emissions during cold start and warm up" 2018