

УДК 621.436

РЕАЛИЗАЦИЯ ЦИКЛА МИЛЛЕРА В ГАЗОВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Логинова Маргарита Вячеславовна^{1,3}, магистрант, инженер-конструктор 3 категории
e-mail: m.loginova@aurumo.ru

Князев Александр Сергеевич^{1,3}, магистрант, инженер-конструктор 3 категории
e-mail: a.knyazev@aurumo.ru

Крючков Анатолий Эдуардович^{1,3}, аспирант, инженер-конструктор 3 категории
e-mail: a.kryuchkov@aurumo.ru

Андрусенко Сергей Евгеньевич^{1,2}, доцент, начальник отдела по системам двигателя
e-mail: sea3105@bk.ru

Коньгин Дмитрий Иванович¹, начальник отдела перспективных разработок
e-mail: d.konygin@aurumo.ru

¹ АО «РУМО», Нижний Новгород, Россия

² Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

³ Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексева, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В настоящее время актуальна проблема перевода газовых двигателей на топлива с низким метановым числом при условии работы на изначальной мощности. Одним из методов решения этой проблемы является применение цикла Миллера. Статья посвящена применению цикла Миллера на газовых двигателях. Рассмотрены варианты реализации цикла Миллера. Проанализирован мировой опыт по использованию цикла Миллера на газовых двигателях.

Ключевые слова: Цикл Миллера, газовый двигатель, рабочий процесс, газораспределение.

REALIZATION OF THE MILLER CYCLE IN GAS INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Loginova Margarita Vyacheslavovna^{1,3}, master's degree student, design engineer of the 3rd category

e-mail: m.loginova@aurumo.ru

Knyazev Alexandr Sergeevich^{1,3}, master's degree student, design engineer of the 3rd category

e-mail: a.knyazev@aurumo.ru

Kryuchkov Anatoly Eduardovich^{1,3}, Doctoral Student, design engineer of the 3rd category

e-mail: a.kryuchkov@aurumo.ru

Andrusenko Sergey Evgenievich^{1,2}, associate Professor of the Department of ESEU, Head of the Engine Systems Department

e-mail: sea3105@bk.ru

Konygin Dmitriy Ivanovich¹, Head of the Advanced Development Department

e-mail: d.konygin@aurumo.ru

¹ JSC «RUMO», Nizhny Novgorod, Russia

² Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

³ Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Currently, the problem of converting gas engines to fuels with a low methane number is relevant, provided they operate at their initial capacity. One of the methods to solve this problem is to use the Miller cycle. The article is devoted to the application of the Miller cycle on gas engines. Variants of the Miller cycle implementation are considered. The world experience in using the Miller cycle on gas engines is analyzed.

Keywords: Miller cycle, gas engine, workflow, gas distribution.

Введение

Тенденция ужесточения экологических норм является сильным импульсом для развития новых технологий и поиска новых решений в двигателестроительной отрасли. Особое внимание уделяется уменьшению веществ в отработавших газах двигателя, которые имеют негативное влияние на здоровье человека и климат.

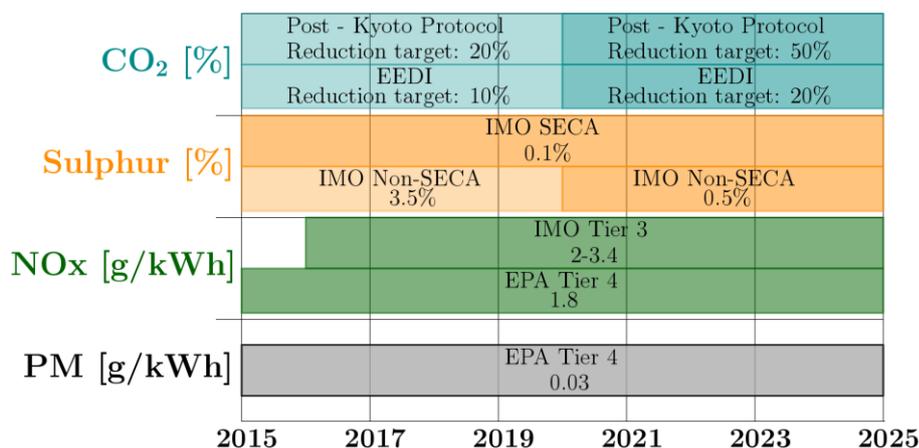


Рисунок 1 – Экологические нормы выбросов для судов [1]

На рисунке 1 отражена динамика изменения экологических норм выбросов для судов и основные регулируемые параметры, такие как содержание углекислого газа (CO₂), серы (S), оксидов азота (NO_x) и твердых частиц (PM).

Одним из решений проблемы соответствия международным экологическим стандартам, является использование газовых двигателей в составе пропульсивного комплекса судна. Преимущество газовых двигателей перед дизельными по эмиссии вредных веществ демонстрирует фирма Yanmar Co. LT [2] на примере двигателя EYG 26L. (рис. 2). Наиболее регулируемый параметр выбросов – оксиды азота, составляют в газовом двигателе всего 14% от выбросов дизельного двигателя.

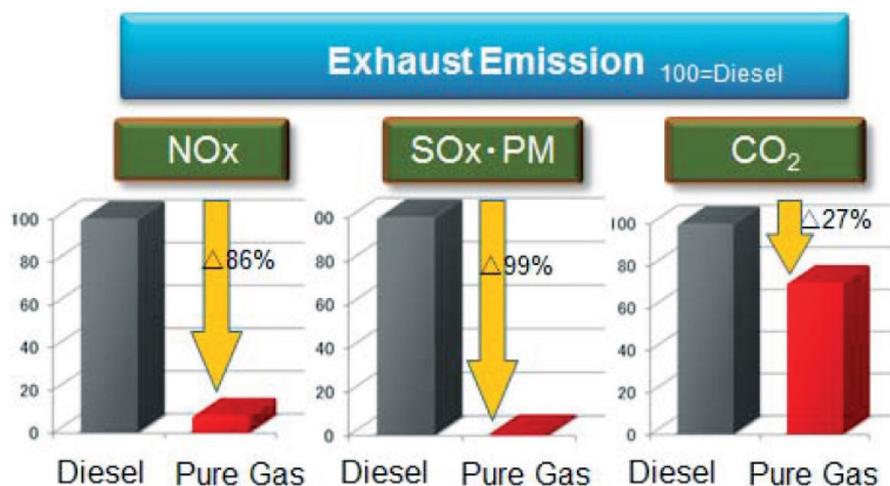


Рисунок 2 – Сравнение выбросов дизельного и газового двигателей

Таким образом, использование газовых двигателей представляется наиболее перспективной альтернативой.

Наблюдается мировая тенденция к увеличению количества судов, работающих на сжиженном природном газе (LNG) (рис. 3). Так доля танкеров для перевозки продуктов и химикатов, работающих на газе, за десятилетие (с 2020 до 2030) должна возрасти в три раза [3].

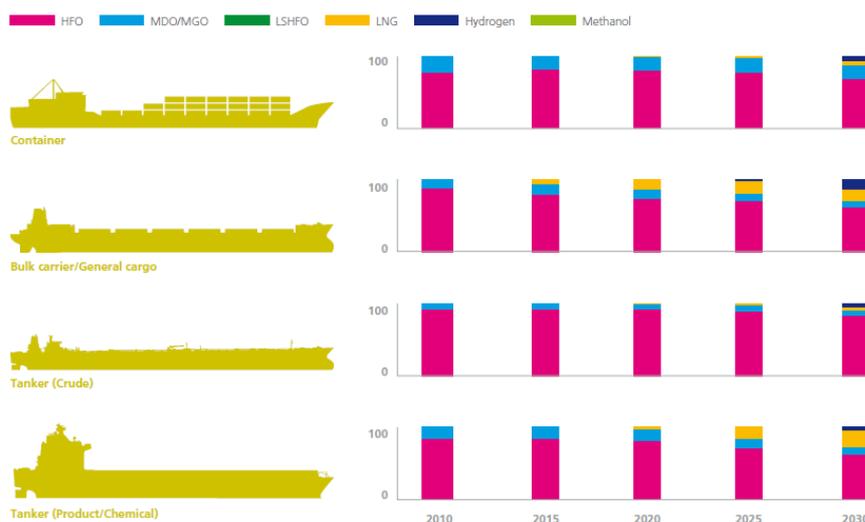


Рисунок 3 – Топливный баланс для контейнеровозов, балкеров/генеральных грузов, танкеров (сырая нефть) и танкеров (продукты/химикаты) (%)

Применение цикла Миллера на газовых двигателях

Однако, газовые двигатели часто дефорсированы, относительно дизельных с такой же размерностью. Одно из наиболее важных ограничений по форсировке газовых двигателей — это высокие температуры отработавших газов (далее T_{ex}) и возникновение детонационных явлений, что не позволяет использовать степень сжатия как у аналогичного дизеля [4].

Применение цикла Миллера помогает решить проблему форсирования газовых двигателей.

В случае обычного поршневого двигателя внутреннего сгорания моменты закрытия впускного клапана и открытия выпускного клапана находятся вблизи нижней мертвой

точки, а степень сжатия и степень расширения примерно одинаковы. В цикле Миллера, как показано на рисунке 4, эффективный момент закрытия впускного клапана немного смещен до или после нижней мертвой точки, что служит для уменьшения эффективной степени сжатия. Тем самым степень расширения больше, чем степень сжатия. Другими словами, применение цикла Миллера позволяет поддерживать степень сжатия на таком уровне, при котором не происходит детонации, а увеличение степени расширения обеспечивает повышение мощности [5].

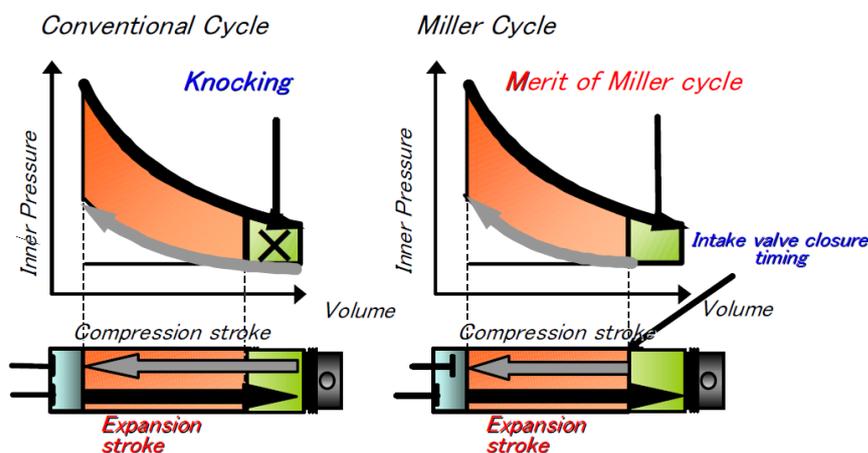


Рисунок 3 – Сравнение классического цикла Отто и цикла Миллера

Цикл Миллера можно реализовать тремя способами (рисунок 5):

- 1) использование поворотного клапана управления впуском (ICRV) [6];
- 2) раннее закрытие впускного клапана (EIVC) [7, 8];
- 3) позднее закрытие впускного клапана (LIVC) [6, 9, 10].

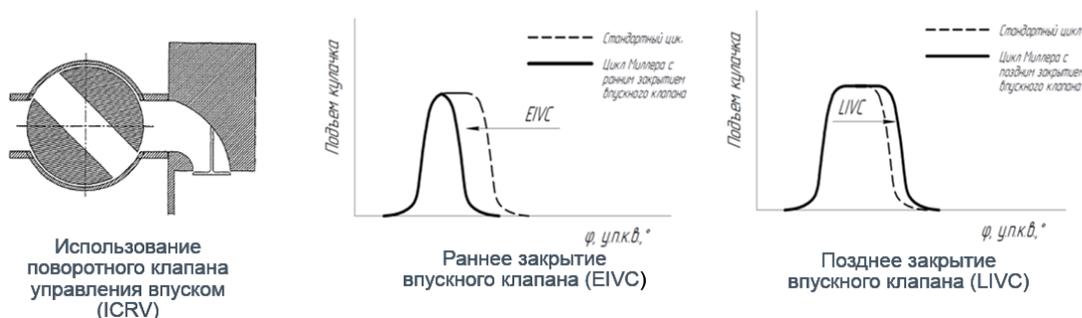


Рисунок 4 – Способы реализации цикла Миллера

Наибольшее распространение получили два последних варианта, в то время как вопрос использования поворотного клапана находится на уровне теоретических исследований [11]. Исследования показали, что EIVC снижает уровень турбулентности в цилиндре, что приводит к более медленному распространению пламени, в то время как LIVC оказывает менее негативное влияние на турбулентность и смесеобразование, особенно при средних оборотах двигателя. Однако стратегия EIVC имеет некоторые преимущества в двигателе без EGR по сравнению с LIVC благодаря более низкой температуре в цилиндре и меньшей работе сжатия. Результаты сравнения показали, что стратегия EIVC была более выгодной

для предотвращения насосных потерь, в то время как стратегия LIVC приводила к повышенному давлению в такте сжатия.

Анализ рынка судовых газовых двигателей показал, что преимущественно используется стратегия реализации цикла Миллера с ранним закрытием впускного клапана, как, например, на двигателе GS16R2-РТК производства Mitsubishi, угол закрытия впускного клапана на котором составляет 40 градусов до НМТ [12].

Механизмы управления впускным клапаном

Для адаптации характеристик двигателя ко всем режимам работы, применяют систему электронного управления изменением фаз газораспределения — Variable Valve Timing (VVT). Электронное управление процессом газообмена в двигателе позволяет улучшить очистку цилиндра от отработавших газов и наполнение цилиндра свежим зарядом для всего скоростного и мощностного диапазона работы.

Среди разнообразия конструкций механизмов изменения фаз газораспределения, в судовом двигателестроении получили распространения конструкции с гидравлической системой.

Рассмотрим два варианта исполнения. Первый вариант конструкции Hyundai Heavy Industries изображенный на рисунке 6 [13].

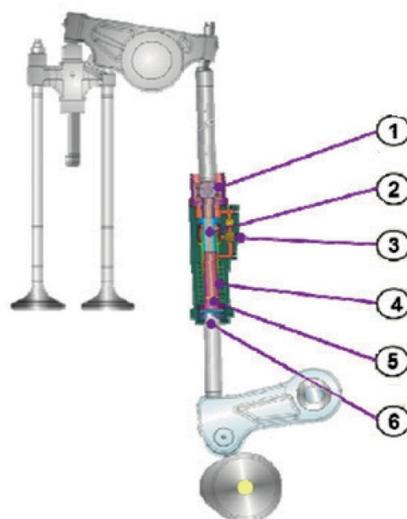


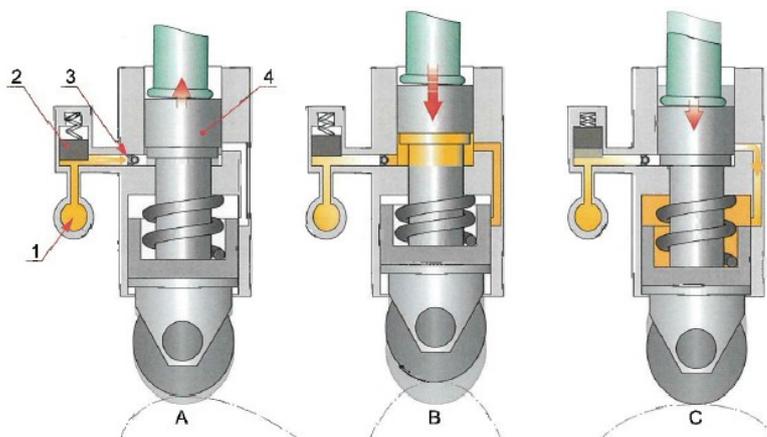
Рисунок 5 – Конструкция системы изменения фаз газораспределения фирмы Hyundai Heavy Industries:

1 — сферическая опора верхней штанги толкателя; 2 — верхний плунжер; 3 — клапан подачи масла; 4 — возвратная пружина; 5 — нижний плунжер; 6 — сферическая опора нижней штанги

Благодаря использованию в конструкции привода клапанов передаточного звена в виде управляемого гидроцилиндра, показана реализация возможности изменения времени открытия клапана в зависимости от давления масла, создаваемого в полости под верхним плунжером. Управляющее воздействие на клапан 3 формируется исходя из параметров состояния и режима работы двигателя.

Второй вариант конструкции производства Wartsila представлен на рисунке 7 [14]. Механизм VIC представляет собой гидравлическую систему, установленную в механизме впускных клапанов, в которой в качестве гидравлической рабочей среды используется смазочное моторное масло. Когда регулирующий клапан закрыт, масло не подается к направляющим блокам системы VIC, и система VIC не работает. Когда регулирующий клапан открывается, в питающем маслопроводе нагнетается давление, и система VIC активируется. Во время подъема кулачка поршень совершает такт всасывания, и масло

попадает в камеру через обратный клапан. При максимальном подъеме кулачка поршень внутри VIC остается в самом высоком положении, потому что толкатель блокирует канал возврата масла. Таким образом задерживается момент закрывания впускного клапана. При перемещении толкателя клапана вниз в соответствии с профилем кулачка в определенной точке канал возврата масла открывается. Масло возвращается в масляный поддон, и давление под поршнем уменьшается, в результате чего впускной клапан закрывается.



- 1 Подача масла
- 2 Управляющий клапан открыт
- 3 Невозвратный клапан
- 4 Поршень

Рисунок 6 – Режимы работы VIC механизма фирмы Wartsila

Оба этих варианта позволяют реализовать цикл Миллера в двигателях с нижним распредвалом.

Заключение

Несмотря на трудности с форсированием, газовые двигатели уверенно занимают свою нишу в судовом двигателестроении. Тем самым, интенсифицируя процесс поиска решений по их модернизации. Одним из путей решения стало применение цикла Миллера с вариантами его реализации в судовом двигателе, что привело к отсутствию детонационных явлений и улучшению экологических параметров.

Список литературы:

1. Krivopolianskii V., Valberg I., Stenersen D., Ushakov S., Æsøy V. Control of the combustion process and emission formation in marine gas engines - a review // Journal of Marine Science and Technology. – 2018. – №24
2. Issei, O., K. Nishida, and K. Hirose. “New marine gas engine development in YANMAR.” Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special (2016): Pp. 36.
3. T. W. P. Smith, C. Raucci, N. Sabio, D. Argyros, Global Marine Fuel Trends 2030
4. Бахмутов С.В., Козлов А.В., Лукшо В.А., Теренченко А.С. ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОФОРСИРОВАННЫХ ГАЗОВЫХ И ГАЗОДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ // МЕХАНИКА МАШИН, МЕХАНИЗМОВ И МАТЕРИАЛОВ. – 2018. – №45
5. Matsushita Y., Fujiwaka T., Tanaka K., Noguchi T. LEAN BURN MILLER CYCLE GAS ENGINE COGENERATION SYSTEM // IGRC 2011 Proceedings and Presentations

6. Yan B. et al. The effects of LIVC miller cycle on the combustion characteristics and thermal efficiency in a stoichiometric operation natural gas engine with EGR. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 122, 1, pp. 439 – 450.
7. Li T., Gao Y., Wang J. et al. The miller cycle effects on improvement of fuel economy in a highly boosted, high compression ratio, direct-injection gasoline engine: EIVC vs. LIVC. *Energy Conversion and Management*, 2014, vol. 79, pp. 59 – 65.
8. Millo F., Luisi S., Borean F. et al. Numerical and experimental investigation on combustion characteristics of a spark ignition engine with an early intake valve closing load control. *Fuel*, 2014, vol. 121, pp. 298 – 310.
9. Wang Y., Zeng S., Huang J., He Y., Huang X., Lin L., Li S. Experimental investigation 686 of applying Miller cycle to reduce NOx emission from diesel engine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2005, vol. 219 (8), pp. 631 – 638.
10. Pedrozo V. B., Zhao H. Improvement in high load ethanol-diesel dual-fuel combustion by Miller cycle and charge air cooling. *Applied Energy*, 2018, vol. 210, 1, pp. 138 – 151.
11. Clarke D., Smith W.J. The Simulation, implementation and analysis of the miller cycle using an in-let control rotary valve. *SAE Technical Paper*. – 1997
12. Okamoto K., Zhang F., Shimogata S., Shoji F., Kanesaka H., Sakai H. Study on Miller Cycle Gas Engine for Co-generation Systems - Effect of Miller Cycle on the Performance of Gas Engine // *SAE TECHNICAL PAPER SERIES*. – 1996
13. Vervaeke L. Update on the extended engine portfolio of Anglo Belgian Corporation / L. Vervaeke // *Ship & Offshore | Schiff&Hafen*. — June 2016. — Special. — Pp. 10.
14. Руководство по эксплуатации и техническому обслуживанию двигателя W6L20. – Wartsila. – 2020

