

14. Герасиди В., Дубровин Р.Г. Эксплуатация турбокомпрессоров судовых дизель-генераторов, работающих на тяжелом топливе// Наука и инновации.– 2009.– Т. 14.– С. 3.
15. Хекерт Е.В., Николаев Н.И., Герасиди В.В. Контроль состояния двигателя фирмы "caterpillar" сат 3512 грунтонасосной установки земснаряда по вибрационным параметрам.// Морские интеллектуальные технологии.– 2018.– № 1-1 (39).– С. 100-105.

REFERENCES

1. Mezhdunarodnaya Konventsiya po predotvrashcheniyu zagryazneniya s sudov (МК MARPOL-73/78), Kniga III, Sankt-Peterburg, АО «TsNIIMF», 2017. 412 p.
2. Voznitskiy I.V., Punda A.S. Sudovye dvigateli vnutrennego sgoraniya, tom 2. Moscow, Morkniga, 2008. 470 p.
3. Lashko V. A. (2014). Perspektivy razvitiya intellektual'nykh porshnevnykh DVS. Elektronnoe nauchnoe izdanie «Uchenye zametki TOGU», Tom 5, 1, 260-287.
4. Nikolaev N.I., Zinenko N.N., Panamarev V.E. Teploekhnicheskije i ekologicheskie parametry sovremennykh dizel'nykh i kotel'nykh ustanovok morskikh sudov v ekspluatatsii, monografiya. Novorossiysk, RIO GMU im. adm. F.F. Ushakova, 2017. 154 p.
5. Galyshev Yu.V., Zaytsev A.B., Sidorov A.A., Shabanov A.Yu.Yakson., I.A. Rabochie protsessy i toksichnost' otrabotavshikh gazov sudovykh dizel'nykh i gazoporshnevnykh dvigateley, uchebnoe posobie. Izd. vtoroe pererab. i dop. Sankt-Peterburg, Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskij universitet Petra Velikogo, 2019. 355 p.
6. Mel'nik G.V. (2013). Razvitie dvigatelestroeniya za rubezhom (po materialam kongressa CIMAC 2013). Dvigatelistroenie, 3, 39-53.
7. Hountalas T. Two-Stroke Marine Diesel Engine Variable Injection Timing System Performance Evaluation And Optimum Setting For Minimum Fuel Consumption At Acceptable NOx Levels / D.T. Hountalas, S. Raptotiasios, A. Antonopoulos, S. Daniolos, I. Dolaptzis, M. Tsobanoglou // Proceedings of the ASME 2014 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, June 25-27, 2014, Copenhagen, Denmark.
8. Sovremennye tendentsii v organizatsii rabocheho protsessa dvigateley. URL: <http://mirmarine.net/dvs/toplivnye-sistemy/pokazateli-raboty-toplivnoj-apparatury-sovremennykh-dizelej/420-sovremennye-tendentsii-v-organizatsii-rabocheho-protsessa-dvigatelej> (data obrashcheniya 28.05.2019).
9. Akhnazarova S.L., Kafarov V.V. Metody optimizatsii eksperimenta v khimicheskoy tekhnologii. Ucheb. posobie. 2-e izd., pererab. i dop. Moscow, Vyssh. shk, 1985. 327 p.
10. Turkin A.V., Turkin V.A., Samoylenko A.Yu. (2018). Modelirovanie rabochikh protsessov maloobrotного судового двигателя для снижения эмиссии оксидов азота. Morskie intellektual'nye sistemy, 1 (39), T.1, 106-110.
11. Kondrat'ev S.I. Teoreticheskie osnovy upravleniya krupnotonnazhnymi sudami po kriteriyam bezopasnosti i energoberezheniya: Dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk.- Novorossiysk, 2004.
12. Karakaev A.B., Lukanin A.V., Hekert E.V. Razrabotka metodologii, metodov i modelej analiza vliyaniya razlichnykh variantov postroeniya struktury i rezhimov podderzhaniya i vosstanovleniya rabotosposobnosti sudovykh elektroenergeticheskikh sistem (chast' 1). Eksploatatsiya morskogo transporta. 2016. № 3(80). S.54-60.
13. Dubrovin R.G., Gerasidi V.V. Obzor struktury sovremennogo portovogo peregruzochnogo kompleksa po perevalke zernovykh kul'tur//Nauka i innovatsii. 2009. T. 13-5. S. 12.
14. Gerasidi V., Dubrovin R.G. Eksploatatsiya turbokompressorov sudovykh dizel'-generatorov, rabotayushchih na tyazhelom toplive// Nauka i innovatsii. 2009. T. 14. S. 3.
15. Hekert E.V., Nikolaev N.I., Gerasidi V.V. Kontrol sostoyaniya dvigatelya firmy "cat-erpillar" sат 3512 gruntonasosnoj ustanovki zemsnaryada po vibratsionnym parametram.// Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 1-1 (39). S. 100-105.

УДК 504.3.054: 621.43.068.4
DOI: 10.34046/aumsuomt92/17

СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ СУДОВЫМИ ДИЗЕЛЬНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ОПЕРЕЖЕНИЕМ ВПРЫСКА ТОПЛИВА

Р.Ю. Атласов, аспирант
В.А. Туркин, доктор технических наук
Г.В. Игнатенко, аспирант

Выполнен обзор мероприятий, направленных на снижение выбросов оксидов азота судовыми дизельными двигателями посредством настройки их регулировочных параметров. Показано, что одним из таких параметров, позволяющим быстро решать задачу оперативного управления концентра-

цией оксидов азота, выбрасываемых судовыми двигателями, является угол опережения впрыскивания топлива. Во многих публикациях именно данный угол рассматривается в виде основного регулируемого параметра, с помощью которого удается управлять значением удельных выбросов оксидов азота с отработавшими газами судовых дизельных двигателей. Используя метод планирования эксперимента, а также результаты проведенных в судовых условиях опытов получена математическая модель для оценки влияния *нагрузки и угла опережения впрыска топлива* на значение *удельных выбросов* оксидов азота с отработавшими газами главных двигателей модели 6S90MC-C производства компании «MAN Diesel & Turbo». Адекватность предложенной математической модели результатам проведенного эксперимента проверена по критерию Фишера. Учитывая, что математическая модель по критерию Фишера адекватно описывает результаты проведенного эксперимента, сделан вывод о том, что она может быть использована для оценки влияния на значение *удельных выбросов* оксида азота в отработавших газах *нагрузки и угла опережения впрыска топлива* главных двигателей модели 6S90MC-C производства компании «MAN Diesel & Turbo». Данная модель позволяет решать задачу оптимизации значения угла опережения впрыска топлива в зависимости от нагрузки и эксплуатационного состояния судового дизельного двигателя с целью снижения удельных выбросов оксидов азота до значений, нормируемых правилом 13 Окислы азота Приложения VI Конвенции МАРПОЛ 73/78.

Ключевые слова: Судовые дизельные двигатели, удельные выбросы оксидов азота, нагрузка, угол опережения впрыска топлива, планирование эксперимента, математическая модель.

A review of measures aimed at reducing emissions of nitrogen oxides by marine diesel engines by adjusting their adjustment parameters is performed. It is shown that one of these parameters that allows you to quickly solve the problem of operational control of the concentration of nitrogen oxides emitted by marine engines is the angle of advance of fuel injection. In many publications, it is this angle that is considered as the main adjustable parameter, with which it is possible to control the value of specific emissions of nitrogen oxides from the exhaust gases of marine diesel engines. Using the experimental design method and the results of experiments carried out in a ship, a mathematical model was obtained to evaluate the effect of the load and the timing of the fuel injection on the specific emissions of nitrogen oxides with exhaust gases from the main engines of the 6S90MC-C model manufactured by MAN Diesel & Turbo. The adequacy of the proposed mathematical model to the results of the experiment was verified by Fisher's criterion. Given that the mathematical model adequately describes the results of the experiment by the Fisher criterion, it is concluded that it can be used to assess the effect on the specific emissions of nitric oxide in the exhaust gases of the load and the fuel injection timing of the main engines of the company model 6S90MC-C manufactured by the company "MAN Diesel & Turbo". This model allows us to solve the problem of optimizing the value of the lead angle of fuel injection depending on the load and operational condition of the marine diesel engine in order to reduce specific emissions of nitrogen oxides to the values normalized by regulation 13 Nitrogen oxides of Annex VI of MARPOL Convention 73/78.

Key words: Marine diesel engines, specific emissions of nitrogen oxides, load, lead angle of fuel injection, experimental design, mathematical model.

Введение

Актуальность исследования обусловлена ужесточением требований к выбросам токсичных веществ, содержащихся в продуктах сгорания судового топлива. Выбросы вредных веществ от судовых дизельных двигателей регламентируются Приложением VI «Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов» Международной конвенции МАРПОЛ 73/78 [1]. Для дизельного малооборотного двигателя (номинальная частота вращения коленчатого вала двигателя до 130 оборотов в минуту), установленного на судне, построенном начиная с 1 января 2016 года и эксплуатируемом в Североамериканском районе контроля выбросов или в районе контроля выбросов Карибского моря Соединенных Штатов; или установленного на судне, построенном начиная с 1 января 2021 г. и эксплуатируемом в районе контроля выбросов Балтийского моря или в районе контроля выбросов Северного моря содержание оксидов азота (NO_x) в отработавших газах не должно превышать 3,4 г/(кВт·ч), что соответ-

ствует 80%-му ужесточению действовавших ранее нормативов II этапа контроля выбросов оксидов азота.

1. Анализ возможности работы судовых дизельных двигателей производства компании «MAN Diesel & Turbo» на режиме с улучшенными экологическими характеристиками

В работе [2] отмечено, что на образование оксидов азота наиболее сильное влияние оказывает угол опережения впрыскивания топлива $\varphi_{оп}$, то есть регулировочный параметр дизельного двигателя. Объясняется это тем, что при уменьшении угла впрыскивания топлива снижаются максимальная температура сгорания и время, отводимое на это сгорание. Поэтому, как это видно из рисунка 1 [2], с уменьшением угла опережения впрыскивания топлива выброс оксидов азота снижается. Вместе с тем в этой же работе [2] отмечено, что благоприятное влияние уменьшения угла опережения впрыскивания топлива на выбросы оксидов азота приводит, как правило, к некоторому снижению топливной экономичности дизельного двигателя.

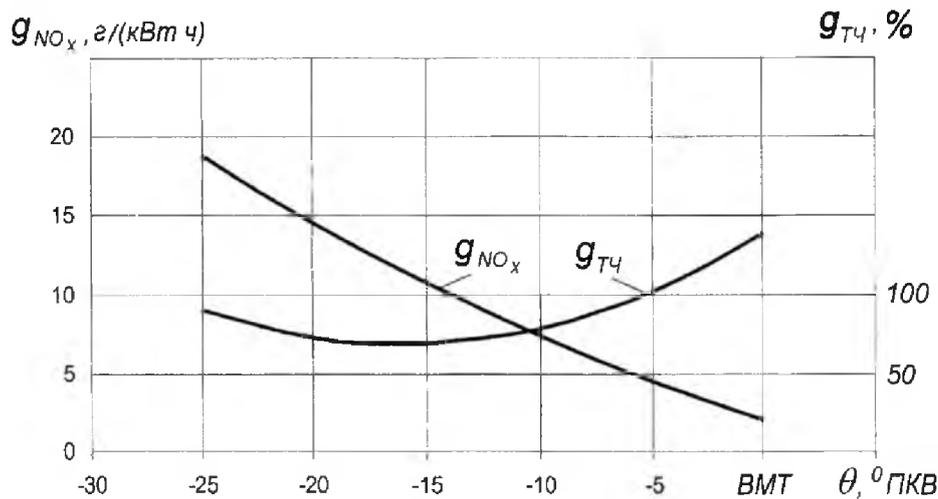


Рисунок 1 – Изменение удельных выбросов оксидов азота в отработавших газах главного двигателя в зависимости от угла опережения впрыскивания топлива

По данным работы [3] уменьшение угла опережения впрыскивания топлива на 10° поворота коленчатого вала дизельного двигателя при работе дизеля на номинальном режиме приводит к снижению содержания оксидов азота в его отработавших газах на 60 % и ухудшению топливной экономичности на 10 % при одновременном увеличении выброса сажи на 100 %.

В эксплуатационной практике возникают ситуации, касающиеся оперативного управления концентрацией вредных веществ, выбрасываемых судовыми двигателями. Это происходит, например, когда судно входит в район контроля выбросов оксидов азота с отработавшими газами (NECA). В таких случаях для выполнения требований ИМО Tier-2 или Tier-3 (для двигателей, установленных на судах построенных после 1 января 2016 года) требуется быстрая настройка двигателя на режим с минимально возможной эмиссией оксидов азота с отработавшими газами и отсутствием видимой дымности отработавших газов даже зачатую в ущерб топливной экономичности.

Одним из регулировочных параметров, позволяющим быстро решать поставленную задачу, является угол опережения впрыскивания топлива [2, 3]. Во многих публикациях именно данный угол рассматривается в виде основного регулируемого параметра, с помощью которого удастся управлять значением удельных выбросов оксидов азота с отработавшими газами.

Наглядное представление о влиянии угла опережения впрыскивания топлива на выбросы оксидов азота и дымность отработавших газов дают графические зависимости, представленные на рисунке 1. Из представленных графических зависимостей следует, что при уменьшении угла

опережения впрыска топлива эмиссия оксидов азота снижается, а дымность наоборот растет.

Данное обстоятельство позволяет утверждать: каждому режиму работы судового дизельного двигателя свойственно рациональное с точки зрения минимального выброса вредных веществ значение угла опережения впрыскивания топлива. Следовательно, реализация этих или подобных им зависимостей в системах автоматического управления судовых дизельных двигателей позволяет снижать значение удельных выбросов оксидов азота с отработавшими газами и, в частности, довести их до уровня требований Tier-2, а в некоторых случаях и до уровня Tier-3, правила 13 «Окислы азота» Приложения VI «Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов» Конвенции МАРПОЛ 73/78 [1]. Такими системами управления оснащаются многие судовые дизельные двигатели производства компании «MAN Diesel & Turbo» [4, 5, 6].

Дизельные двигатели модели 6S90MC-C [6, 7] компании «MAN Diesel & Turbo» характеризуются механическим приводом распределительного вала, контролирующим геометрические фазы впрыска топлива, открытия выпускного и пускового клапанов, из которых только угол опережения впрыска топлива, влияющий на максимальное давления сгорания в цилиндре P_z , может изменяться в эксплуатации с помощью установленной системы изменения угла опережения впрыска топлива (VIT – Variable Injection Timing).

С точки зрения улучшения экологических характеристик работы судовых дизельных двигателей 6S90MC-C производства компании «MAN Diesel & Turbo» преимущество системы Variable

Injection Timing заключается в наличии возможности уменьшить угол опережения впрыскивания топлива, что приводит к снижению удельных выбросов оксидов азота с отработавшими газами.

2. Математическая модель зависимости удельных выбросов диоксида азота от нагрузки и угла опережения впрыска топлива главных двигателей модели 6S90MC-C

Особой проблемой всех существующих системах автоматического управления остается формирование такого значения угла опережения впрыска топлива φ_{on} , при котором значение удельных выбросов оксидов азота с отработавшими газами будет соответствовать требованиям правила 13 Окислы азота Приложения VI Конвенции МАРПОЛ 73/78 [1]. Следовательно, необходимо решить задачу оптимизации угла опережения впрыска топлива на различных режимах работы судовых дизельных двигателей. Для решения данной задачи необходимо иметь математическую модель, позволяющую произвести процесс оптимизации значения угла опережения впрыска топлива в зависимости от нагрузки и эксплуатационного состояния судового дизеля.

С целью получения математической модели, описывающей влияние *нагрузки и угла опережения впрыска топлива* главных двигателей типа 6S90MC-C на значение *удельных выбросов* оксидов азота в отработавших газах, эксперименты проводились по плану в соответствии с рекомендациями теории планирования эксперимента [8].

Математическая модель в общем случае будет иметь следующий вид:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2, \quad (1)$$

где y – значение удельных выбросов оксида азота в отработавших газах главного двигателя, г/(кВт·час); x_i, x_j – значения факторов в кодированном масштабе; b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – значения коэффициентов уравнения регрессии.

Для расчета коэффициентов математической модели (1) был реализован полный факторный эксперимент вида 3^2 , то есть на судовом дизельном двигателе типа 6S90MC-C было проведено 9 опытов для двух независимых факторов z_1 и z_2 при трех значениях каждого фактора (в безразмерной системе координат это: + 1 – максимальное значение фактора; 0 – среднее значение фактора; - 1 – минимальное значение фактора).

Факторами были: z_1 – нагрузка главного двигателя в процентах от максимальной длительной мощности (% MCR); z_2 – угол опережения впрыска топлива в градусах поворота коленчатого вала главного двигателя до верхней мертвой точки (° ПКВ до ВМТ).

Проведение измерения исследуемых величин осуществлялось с учетом рекомендаций, изложенных в работе [9]. Для отбора отработавших газов использовалась стационарная система пробоотбора, которая состояла из пробоотборного зонда, насоса подачи отработавших газов и пробоотборной магистрали с фильтрами для очистки пробы газов и передачи ее в газоанализатор для проведения измерения концентрации вредных веществ, содержащихся в отработавших газах.

Для отбора и анализа состава отработавших газов использовался переносной газоанализатор TESTO 350. В соответствии с информацией, изложенной в сертификате данного прибора, он не требует дополнительной калибровки калибровочным газом, обнуление и калибровка осуществляются автоматически в течение 30 секунд перед началом эксплуатации. Прибор одобрен немецкой экспертной организацией TÜV SÜD и соответствует требованиям европейского стандарта EN 50379. Сертификат об утверждении типа средств измерений допущен к применению в Российской Федерации. Газоанализатор TESTO 350 внесен в Государственный реестр средств измерений РФ под номером 49192-12 и допущен к применению в Российской Федерации.

Частота вращения, расход топлива и массовый расход воздуха замерялись с помощью штатной микропроцессорной системы управления двигателем. Измерение параметров потока отработавших газов производилось прибором для определения скорости газа в автоматическом режиме – трубкой Пито, которая входит в состав газоанализатора TESTO 350. Технические характеристики газоанализатора, диапазоны изменения значений измеряемых величин, а также значения погрешностей при их измерении представлены в таблице 1.

Матрица планирования эксперимента, значения факторов в натуральном масштабе и в безразмерной системе координат, а также результаты проведенных опытов и рассчитанные значения исследуемой величины (*удельные выбросы* диоксида азота в отработавших газах главного двигателя в г/(кВт·час)) представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Технические характеристики прибора TESTO 350

Тип зонда	Диапазон измерения	Погрешность
Измерение температуры Тип К	От - 40 до + 1200 гр. С	+/- 0.5 гр. Цельсия (0 – 99) градус Цельсия +/- 0.5 % от изм. значения в остальном диапазоне Разрешение – 0.1 градус Цельсия
Измерение дифференциаль- ного давления	От - 200 до 200 гПа	+/- 0.5 гПа (-49.9.. 49.9 гПа) +/- 1.5 % от изм. значения в остальном диапазоне Разрешение – 0.1 гПа
Измерение тяги	От – 40 до + 40 гПа	+/- 0.03 гПа (-2.99..+2.99гПа) +/- 1.5 % от изм. значения в остальном диапазоне
Измерение NO	0 – 4000 ppm	+/- 5 % от изм. знач. (+100 ... +1.999 ppm NO) +/- 10 % от изм. знач. (+2.000 ... +4000 ppm NO)
Измерение NO низкое	0 – 300 ppm	+/- 2 ppm (0 ... +39.9 ppm NO) +/- 5 % (+40 ... +300 ppm NO)

Коэффициенты математической модели (1) определяются с использованием следующего выражения:

$$b_j = \sum_{i=1}^N x_{ji}y_i / \sum_{i=1}^N x_{ji}^2 \quad (2)$$

Значимость рассчитанных коэффициентов математической модели оценивалась по критерию Стьюдента в соответствии с методикой, изложенной в работе [8]. Для этого в центре плана были поставлено три опыта, в которых получены следующие значения исследуемой величины y :

$$y_1^0 = 9,89; y_2^0 = 9,67; y_3^0 = 9,63.$$

Затем по значениям y^0 было рассчитано их среднее значение, $\bar{y}^0 = \sum_{u=1}^3 y_u^0 / 3 = 9,73$, и дисперсия воспроизводимости:

$$s_{\text{воспр}}^2 = \sum_{u=1}^3 (y_u^0 - \bar{y}^0)^2 / (u - 1) = 0,0392 / 2 = 0,0196.$$

Методика оценки значимости коэффициентов математической модели с учетом найденного значения дисперсии воспроизводимости применительно к исследованию экологических показателей судовых дизельных двигателе приводится в работе [10].

Таблица 2 – Матрица планирования и реализации эксперимента

№ опыта	Факторы в натуральном масштабе		Факторы в безразмерной системе координат				Исследуемая величина, г/(кВт· час)		
	z_1 , % MCR	z_2 , ° ПКВ до ВМТ	x_1	x_2	$x_1^2 - \frac{2}{3}$	$x_2^2 - \frac{2}{3}$	Из эксперимента	Из полного уравнения	Из упрощенного уравнения
1	25	7,5	- 1	- 1	1/3	1/3	7,79	8,02	7,96
2	25	12,5	- 1	0	1/3	- 2/3	11,99	11,95	11,95
3	25	17,5	- 1	+ 1	1/3	1/3	13,91	13,71	13,77
4	50	7,5	0	- 1	- 2/3	1/3	6,31	5,83	5,83
5	50	12,5	0	0	- 2/3	- 2/3	9,71	9,815	9,815
6	50	17,5	0	+ 1	- 2/3	1/3	11,26	11,64	11,64
7	75	7,5	+ 1	- 1	1/3	1/3	8,11	8,363	8,423
8	75	12,5	+ 1	0	1/3	- 2/3	12,47	12,41	12,41
9	75	17,5	+ 1	+ 1	1/3	1/3	14,47	14,29	14,23

После расчета с использованием зависимости (2) коэффициентов математической модели и исключения незначимого коэффициента b_{12} математическая модель (1) примет следующий вид:

$$\hat{y} = 9,815 + 0,23x_1 + 2,905x_2 + 2,363x_1^2 - 1,08x_2^2 \quad (3)$$

Адекватность математической модели (3) результатам проведенного эксперимента проверена по критерию Фишера с использованием следующей зависимости:

$$F = s_{\text{ост}}^2 / s_{\text{воспр}}^2, \text{ здесь } s_{\text{ост}}^2 = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 / (N - l) = 0,595 / 4 = 0,1488,$$

где l – число значимых коэффициентов математической модели (3), равное 5.

Тогда $F = 0,1488 / 0,0196 = 7,59$.

Табулированное значение критерия Фишера для уровня значимости $p = 0,05$, $f_1 = 5$, $f_2 = 2$, $F_{1-p}(f_1, f_2) = 19,3$.

Так как $F = 7,59 < F_{1-p}(f_1, f_2) = 19,3$, то математическая модель (3) будет адекватно описывать результаты проведенного эксперимента.

Следовательно, полученная математическая модель (3) может быть использована для оценки влияния на значение удельных выбросов оксида азота в отработавших газах нагрузки и угла опережения впрыска топлива главных двигателей модели 6S90MC-C производства компании «MAN Diesel & Turbo».

Заключение

1. Показано, что одним из регулировочных параметров, позволяющим быстро решать задачу оперативного управления концентрацией оксидов азота, выбрасываемых судовыми двигателями, является угол опережения впрыскивания топлива. Во многих публикациях именно данный угол рассматривается в виде основного регулируемого параметра, с помощью которого удастся управлять значением удельных выбросов оксидов азота с отработавшими газами судовых дизельных двигателей.

2. Используя метод планирования эксперимента, а также результаты проведенных в судовых условиях опытов получена математическая модель для оценки влияния нагрузки и угла опережения впрыска топлива на значение удельных выбросов оксидов азота с отработавшими газами главных двигателей модели 6S90MC-C производства компании «MAN Diesel & Turbo». Данная модель позволяет решать задачу оптимизации значения угла опережения впрыска топлива в зависимости от нагрузки и эксплуатационного состояния судового дизельного двигателя с целью снижения удельных выбросов оксидов азота до значений, нормируемых правилом 13 Окислы азота Приложения VI Конвенции МАРПОЛ 73/78.

Литература

1. Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МК МАРПОЛ-73/78), Книга III, – СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2017. – 412 с.
2. Крутов В.И. Определение оптимальных значений угла опережения впрыскивания топлива для дизелей транспортного назначения / В.И. Крутов, В.А. Марков, В.И. Шатров // Двигателестроение. – 1996. – № 11. – С. 31-32.
3. Марков В.А. Токсичность отработавших газов дизелей / В.А. Марков, Р.М. Баширов, И.И. Габитов. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. – 376 с.
4. Марков В.А. Метод снижения токсичности отработавших газов дизелей транспортного назначения

// Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1993. – № 10 – 12. – С. 74-83.

5. Мельник Г.В. Развитие двигателестроения за рубежом (по материалам конгресса CIMAC 2013) // Двигателестроение. – 2013. – № 3. – С. 39-53.
6. MAN Diesel. Marine Engine IMO Tier II, Programme 2nd edition. 2009. 114 p.
7. Hountalas T. Two-Stroke Marine Diesel Engine Variable Injection Timing System Performance Evaluation And Optimum Setting For Minimum Fuel Consumption At Acceptable NOx Levels / D.T. Hountalas, S. Raptotiasios, A. Antonopoulos, S. Daniolos, I. Dolaptzis, M. Tsobanoglou // Proceedings of the ASME 2014 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, June 25-27, 2014, Copenhagen, Denmark.
8. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 327 с.
9. Николаев Н.И. Теплотехнические и экологические параметры современных дизельных и котельных установок морских судов в эксплуатации: монография / Н.И. Николаев, Н.Н. Зиненко, В.Е. Панамарев. – Новороссийск: РИО ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2017. – 154 с.
10. Туркин А.В. Моделирование рабочих процессов малооборотного судового двигателя для снижения эмиссии оксидов азота / А.В. Туркин, В.А. Туркин, А.Ю. Самойленко // Морские интеллектуальные системы. – 2018. – № 1 (39). – Т.1. – С. 106-110.
11. Каракаев А.Б., Луканин А.В., Хекерт Е.В. Разработка методологии, методов и моделей анализа влияния различных вариантов построения структуры и режимов поддержания и восстановления работоспособности судовых электроэнергетических систем (часть 1) // Эксплуатация морского транспорта. – 2016. – № 3(80). – С.54-60.
12. Астреин В.В. Алгоритм самоорганизации групп судов для предупреждения столкновений [Текст] / В.В. Астреин, С.И. Кондратьев, Е.В. Хекерт // Эксплуатация морского транспорта. – 2016. – № 2 (79). – С. 45-50.
13. Хекерт Е.В., Николаев Н.И., Герасиди В.В. Контроль состояния двигателя фирмы "caterpillar" cat 3512 грунтонасосной установки земснаряда по вибрационным параметрам. // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 1-1 (39). – С. 100-105.

REFERENCES

1. Mezhdunarodnaya Konventsiya po predotvrashcheniyu zagryazneniya s sudov (MK MARPOL-73/78), Kniga III, Sankt-Peterburg, AO «TsNIIMF», 2017. 412 p.
2. Krutov V.I., Markov V.A., Shatrov V.I. (1996). Opreделение optimal'nykh znacheniy ugla operezheniya vpryskivaniya topliva dlya dizeley transportnogo naznacheniya. Dvigatelistroenie, 11, 31-32.

3. Markov V.A., Bashirov R.M., Gabitov I.I. Toksichnost' otrabotavshikh gazov dizeley. Moscow, Izd-vo MGTU im. Baumana, 2002, 376 p.
4. Markov V.A. (1993). Metod snizheniya toksichnosti otrabotavshikh gazov dizeley transportnogo naznacheniya // Izvestiya VUZov. Mashinostroenie. 10 – 12, 74-83.
5. Mel'nik G.V. (2013). Razvitie dvigatelestroeniya za rubezhom (po materialam kongressa CIMAC 2013). Dvigatelestroenie, 3, 39-53.
6. MAN Diesel. Marine Engine IMO Tier II, Programme 2nd edition. 2009. 114 p.
7. Hountalas T. Two-Stroke Marine Diesel Engine Variable Injection Timing System Performance Evaluation And Optimum Setting For Minimum Fuel Consumption At Acceptable NOx Levels / D.T. Hountalas, S. Raptotiasios, A. Antonopoulos, S. Daniolos, I. Dolaptzis, M. Tsobanoglou // Proceedings of the ASME 2014 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, June 25-27, 2014, Copenhagen, Denmark.
8. Akhnazarova S.L., Kafarov V.V. Metody optimizatsii eksperimenta v khimicheskoy tekhnologii. Ucheb. posobie. 2-e izd., pererab. i dop. Moscow, Vyssh. shk, 1985, 327 p.
9. Nikolaev N.I., Zinenko N.N., Panamarev V.E. Teploekhnicheskie i ekologicheskie parametry sovremennykh dizel'nykh i kotel'nykh ustanovok morskikh sudov v ekspluatatsii, monografiya. Novorossiysk, RIO GMU im. adm. F.F. Ushakova, 2017. 154 p.
10. Turkin A.V., Turkin V.A., Samoilenko A.Yu. (2018). Modelirovanie rabochikh protsessov malooborotnogo sudovogo dvigatelya dlya snizheniya emissii oksidov azota. Morskie intellektual'nye sistemy, 1 (39), T.1, 106-110.
11. Karakaev A.B., Lukanin A.V., Hekert E.V. Razrabotka metodologii, metodov i modelej analiza vliyaniya razlichnykh variantov postroeniya struktury i rezhimov podderzhaniya i vosstanovleniya rabotosposobnosti sudovykh elektroenergeticheskikh sistem (chast' 1)/Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2016. № 3(80). S.54-60.
12. Astrein V.V. Algoritm samoorganizatsii grupp sudov dlya preduprezhdeniya stolknovenij [Tekst]/V.V. Astrein, S.I. Kondrat'ev, E.V. Hekert //Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2016. № 2 (79). S. 45-50.
13. Hekert E.V., Nikolaev N.I., Gerasidi V.V. Kontrol' sostoyaniya dvigatelya firmy "cat-erpillar" sat 3512 gruntonasosnoj ustanovki zemsnyarada po vibratsionnym parametram. // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 1-1 (39). S. 100-105.

УДК 621.3.01(076)

DOI: 10.34046/aumsuomt92/18

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ И МЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СПЕЦИАЛЬНОГО ОДНОФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ БЕЗ ВНЕШНИХ ФАЗОСДВИГАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ СУДОВЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

*А. Б. Каракаев, доктор технических наук, профессор,
А. В. Костенко, аспирант,
А. И. Епихин, кандидат технических наук*

Отмечается, что современные системы автоматизации судов морского и речного флота включают в свой состав большое количество однофазных асинхронных электродвигателей. На сегодняшний день существует только теоретическое описание таких электрических машин, которое учитывает влияние не всех переходных процессов, происходящих в специальной асинхронной машине. Для того, чтобы математически описать происходящие в двигателе процессы в статье предложена разработанная математическая модель, которая учитывает влияние переходных процессов во всех режимах работы асинхронной электрической машины. Для пояснения явлений, происходящих в электромоторе, приводятся механические характеристики, а также зависимость пускового и максимального момента двигателя от угла. Результатом работы является получение математической модели, описывающей электромагнитные процессы, протекающие в однофазных асинхронных двигателях в установившемся режиме, вывод уравнения для электромагнитного момента и построение механических характеристик двигателя, а также полученная математическая модель дает возможность расчета электромеханических переходных процессов, протекающих в однофазных асинхронных двигателях без внешних фазосдвигающих устройств.

Ключевые слова: однофазные асинхронные двигатели, математическая модель, внешние фазосдвигающие устройства, судовые системы автоматизации, переходные процессы.

It is noted that modern automation systems for ships of the sea and river fleet are equipped with these special electric motors. The question of constructing a new mathematical model of a special asynchronous electric motor without external phase-shifting devices is considered, since today there is only a theoretical description of such models, which takes into account the influence of not all transients occurring in a special asynchronous machine. For these purposes, a new mathematical model is proposed in the article, which takes into account the influence of transients in all modes of operation of an asynchronous electric machine. The analysis of the main