

6. Мамедов, Б. Ш. Единая теория двигателей. Новое назначение и принцип работы «нулевой» ступени компрессора низкого давления [Текст]: тез. докл. / Б. Ш. Мамедов // XIX Международный конгресс двигателестроителей, 14–19 сентября 2014 г. — Х.: ХАИ, 2014. — С. 70.
7. Карпов, Я. С. Основы аэрокосмической техники [Текст]: учеб. / Я. С. Карпов, Б. А. Панасенко, А. И. Рыженко. — Х.: ХАИ, 2007. — 656 с.
8. Стечкин, Б. С. Избранные труды. Теория тепловых двигателей [Текст]: учеб. / Б. С. Стечкин. — М.: Наука, 1977. — 410 с.
9. Нечаев, Ю. Н. Теория авиационных газотурбинных двигателей [Текст]: учеб. / Ю. Н. Нечаев, Р. М. Федоров. — М.: Машиностроение, 1977. — Ч. 1. — 311 с.
10. Micheli, M. Compressor Design From Specification to Validation: Application of a Fast and Reliable Process [Text] / M. Micheli, W. Kappis, G. Guidati, M. Felderhoff // Volume 7: Turbomachinery, Parts A and B. — 2009. — Paper № GT2009-59217. — P. 365–372. doi:10.1115/gt2009-59217
11. Terauchi, K. Redesign of an 11-Stage Axial Compressor for Industrial Gas Turbine [Text] / K. Terauchi, D. Kariya, S. Maeda, K. Yoshiura // Volume 6: Turbo Expo 2005, Parts A and B. — 2005. — Paper № GT2005-68689. — P. 261–267. doi:10.1115/gt2005-68689
12. Турбореактивный двоконтурный двигун [Текст]: пат. 86788 Україна, МПК F02K 1/00, F02K 3/00, F02C 7/00 / Мамедов Б. Ш.; заявник та патентовласник: Запорізький національний технічний університет. — № u200607941; заявл. 14.07.2006; опубл. 25.05.2009, Бюл. № 10. — 24 с.
13. Казанджан, П. К. Теория авиационных двигателей [Текст] / П. К. Казанджан, Н. Д. Тихонов, А. К. Янко. — М.: Машиностроение, 1983. — 223 с.
14. Горячкин, Е. С. Моделирование рабочего процесса трехступенчатого компрессора низкого давления газотурбинного двигателя [Текст] / Е. С. Горячкин, Г. М. Попов, В. Н. Матвеев // Авиационно-космическая техника и технология. — 2014. — № 8/115. — С. 61–65.
15. Гражданская авиация России [Текст]. — М.: Военный парад, 2004. — 336 с.

РОЗРАХУНОК СТУПЕНЯ ПІДВИЩЕННЯ ТИСКУ ОСЬОВИХ КОМПРЕСОРІВ ПОВІТРЯ-РЕАКТИВНИХ ДВИГУНІВ

У роботі доказано, що існуюча у сучасній теорії ПРД думка про те, що у зоні Н-В₂ зовнішня робота від турбіни (двигуна) до газового потоку не підводиться, а стиснення газового потоку до максимальної P_k^* у зоні В₂-К відбувається тільки дифузійними міжлопаточними каналами робочих коліс компресорів низького, середнього та високого тиску (КНТ, КСТ, КВТ), помилкова і пояснюється тим, що в КНТ, КСТ, КВТ не існує дифузійних каналів, а існують тільки конфузійні канали.

Ключові слова: кінетична і потенційна енергія, сила інерції, осьовий компресор.

Мамедов Борис Шамшадович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра начертальної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки, Запорізький національний технічний університет, Україна.

Штанько Петр Константинович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра механіки, Запорізький національний технічний університет, Україна.

Мамедов Борис Шамшадович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки, Запорізький національний технічний університет, Україна.

Штанько Петро Костянтинівич, кандидат технічних наук, доцент, кафедра механіки, Запорізький національний технічний університет, Україна.

Mamedov Boris, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine. Shtanyko Petr, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine

УДК 621.431.74

DOI: 10.15587/2312-8372.2016.67005

Луковцев В. С.,
Борисенков Е. Е.,
Гвоздева И. М.

УПРАВЛЕНИЕ МОЩНОСТЬЮ ГЛАВНОГО ДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

В работе исследована проблема управления мощностью главного двигателя с учетом влияния гидрометеорологических условий мореплавания. Рассматриваемая в работе концепция дизель-электрохода создает возможность обеспечить необходимую оперативность управления судовой двигательной установкой в штормовых ситуациях. Указанная задача решается путем разработки закона управления электрической машиной, работающей на один вал с главным двигателем, и контроля необходимых гидрометеорологических параметров.

Ключевые слова: главный двигатель, гидрометеорологические условия, протопульсивный комплекс, топливно-энергетические ресурсы, электрическая машина.

1. Введение

Эффективность использования транспортных судов для перевозки грузов неразрывно связана с рациональным распределением нагрузки главного двигателя. В силу того, что транспортные суда эксплуатируются на протяженных рейсовых линиях, где постоянно меняются гидрометеорологические условия, главному двигателю необходимо перестраиваться на новый маршрут плавания, участки которого отличаются разным сопротивлением среды движению судна.

В итоге не обеспечиваются постоянная нагрузка и постоянство скоростного режима работы главного двигателя, в качестве которого обычно используется малооборотный дизель (МОД) с регулятором частоты вращения и прямой передачей мощности на гребной винт [1].

Данное противоречие создает проблему эффективного управления мощностью главного двигателя, осуществляемого на основе учета гидрометеорологических условий района мореплавания с целью минимизации расхода топливно-энергетических ресурсов при выполнении

рейса за плановое время. Этим обосновывается актуальность проведенного исследования.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В области повышения эффективности судовых энергетических установок стоит отметить высокий уровень достижений как отечественных, так и зарубежных авторов, среди которых можно отметить работы С. А. Головинова [2], Н. Н. Фомина, Н. Н. Свистунова [3], Б. П. Башурова [4], J. Björnstedt, F. Sulla, O. Samuelsson [5], S. P. Y. Santos, E. Delbone, E. F. Carvalho, L. N. Martins [6] и др.

В работе [7] приведен алгоритм оперативного оптимального управления нагрузкой судового главного двигателя с учетом гидрометеорологических условий мореплавания, основанный на применении модифицированного комплексного метода и позволяющий минимизировать рейсовый расход топлива.

В работе [8] раскрыта сущность концепции гибридного привода двигателя, интегрирующего эффективность традиционного дизельного и дизель-электрического пропульсивного комплекса с асинхронным двигателем (АД), работающим в комплексе с МОД на одну линию вала и исполняющим функцию дополнительной мощности (бустера). Предложена оптимизация режимов работы МОД с частотно-управляемым АД на линии вала при передаче мощности в двигатель за счет уменьшения потребления топлива и амплитуды крутильных колебаний.

Однако, несмотря на масштабность научных работ в данной сфере исследования, вопрос повышения эффективности судовых энергетических установок (СЭУ) на основе применения электрической машины в пропульсивном комплексе судна остается нерешенным. В частности, не решена проблема влияния гидрометеорологических условий на общую динамику работы винта, гребного вала и двигателя при решении проблемы минимизации топливно-энергетических ресурсов.

3. Объект, цель и задачи исследования

Объект исследования — процесс изменения нагрузки на главный двигатель в результате влияния гидрометеорологических условий.

Цель исследования — исследовать проблемы управления мощностью главного двигателя, осуществляемого на основе учета гидрометеорологических условий мореплавания с целью минимизации топливно-энергетических ресурсов и обеспечения требуемых режимов работы СЭУ, необходимых для выполнения рейса за плановое время.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить такие задачи:

1. Исследование процессов в элементах пропульсивного комплекса при изменении нагрузки на главный двигатель в результате влияния гидрометеорологических условий.

2. Разработка закона управления мощностью главного двигателя с учетом влияния гидрометеорологических условий (под гидрометеорологическими условиями понимается: амплитуда волнения, скорость и направление ветра, течение).

3. Разработать блок-схему системы управления электрической машины, работающей на один вал с главным двигателем.

4. Результаты исследований повышения эффективности судовой энергетической установки с помощью электрической машины

Основными элементами системы пропульсивного комплекса являются: дизельный двигатель, электрический асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, гребной вал с трением и гидродинамически нагруженный винт.

Вращательная динамика нагруженного винта описывается следующими уравнениями [8]:

$$\begin{aligned} Q_m^* &= \frac{1}{T_m}(Q_c - Q_m); \\ J \frac{d\omega}{dt} &= Q_m^* - Q_p - k_\omega \omega; \\ Q_p &= f_Q(\theta, \xi), \end{aligned} \quad (1)$$

где Q_m^* — крутящий момент на валу главного двигателя при использовании электрической машины; T_m — электромеханическая постоянная времени; Q_c — заданный крутящий момент; Q_m — крутящий момент на валу главного двигателя; J — инерция вращения винта, включая присоединенную массу, валов, зубчатых колес и двигателя; K_ω — линейный коэффициент трения; ω — частота вращения пропеллера в рад/с; Q_p — крутящий момент на гребном валу.

Момент нагрузки моделируется как общая функция фиксированных параметров θ (диаметр винта, количество лопастей, отношение увеличенной площади лопасти гребного винта к шагу винта) и переменных параметров ξ (частота вращения вала, осадка судна). Тяга винта T_p , учитывающая момент нагрузки и переменные параметры, описывается, функцией:

$$T_p = f_T(\theta, \xi). \quad (2)$$

Оценка крутящего момента на гребном валу имеет важное значение для оценки потерь топлива, гидродинамических параметров, а также для контроля гидрометеорологических условий в районе плавания судна. Согласно (1), математическая модель вращательного движения вала запишется в виде:

$$\begin{aligned} Q_p^* &= -\frac{1}{T_Q} Q_p + \omega_Q, \\ J \frac{d\omega}{dt} &= Q_m^* - Q_p^* - K_\omega \omega, \end{aligned} \quad (3)$$

где крутящий момент на гребном валу Q_p^* может быть смоделирован как марковский процесс первого порядка с постоянной времени T_Q .

При управлении мощностью главного двигателя, необходимо учитывать коэффициент потерь крутящего

момента β_Q , который может быть вычислен из уравнения (3) на основе измерения величины крутящего момента на гребном валу Q_p [9, 10]:

$$W_{n0} = f(T_d)K_q D^5 n^2, \tag{4}$$

где K , D и n — соответствующие конструктивные параметры винта.

Расчетные потери крутящего момента по отношению к его номинальному значению относительно измеренной скорости вращения вала составляют [7]:

$$\beta_Q = \alpha_b(n) + (1 - \alpha_b(n)) \frac{Q_p^*}{Q_m^*}, \tag{5}$$

где $\alpha_b(n)$ — весовая функция типа:

$$\alpha_b(n) = e^{-k|p|}, \tag{6}$$

где k , p — положительные коэффициенты.

Весовая функция необходима для задания скорости, в противном случае оценка будет проводиться только для нулевой частоты вращения вала.

Управляющее воздействие инициируется контроллером гидрометеорологических условий плавания, работающим по заданному алгоритму. Основная идея заключается в рациональном распределении нагрузки между МОД и АД при обнаружении изменений гидрометеорологических условий. С этой целью вводится переменная ζ : $0 \rightarrow 1$, которая отражает пропорциональность распределения нагрузки, а также способствовать увеличению нагрузки в случае, когда гидрометеорологические условия вернутся к норме, т. е. ζ : $1 \rightarrow 0$. Основной контроль гидрометеорологических условий, заключается в измерении изменений выходного сигнала регулятора крутящего момента с коэффициентом изменения γ :

$$W_{CAP} = \gamma W_{cc} = \gamma(\alpha_c(n)W_{cp} + (1 - \alpha_c(n))W_{cp}). \tag{7}$$

Коэффициент γ выбирается в интервале $[0..1]$. При неизменных гидрометеорологических условиях полагаем, что крутящий момент гребного вала Q_p , крутящий момент двигателя Q_m , и заданный крутящий момент равны друг другу. Приняв $\gamma = \beta_Q$, и предполагая, что частота вращения вала $n > 0$, в результате математических преобразований получим выражения для передаточной функции пропульсивного комплекса:

$$\begin{aligned} W_p = W_m = W_{CAP} &= \gamma W_{cc} = \frac{W_p}{W_{n0}} W_{cc} = \\ &= \frac{Q_p^*}{f(T_d)K_{op}D^5 n^2} W_{cc}. \end{aligned} \tag{8}$$

Желаемая частота вращения вала задается как [9]:

$$n_d = \sqrt{\frac{|T_d|}{\rho D^4 K}}; W_{cn} = f(n - n_d). \tag{9}$$

Исходя из соотношений [9] предполагается, что закон регулирования, описываемый формулой (7), даст нужный результат. При неизменных гидрометеорологических условиях полагаем $\gamma = \beta_Q$ в (7), что позволит обеспечить постоянство частоты вращения гребного вала с помощью поддержания заданной частоты, указанной в формуле (9).

В качестве основного управляющего воздействия на контроллер подается сигнал, пропорциональный изменению гидрометеорологических условий [6]:

$$\gamma = \begin{cases} 1, & \text{при } \xi = 0, \\ \beta_Q, & \text{при } \xi = 1. \end{cases} \tag{10}$$

Переход от 1 к некоторому значению β_Q осуществляется при неблагоприятных гидрометеорологических условиях и ограничении скорости передачи $|\partial\gamma/\partial t| < k$, где k обычно равно 1. При смене сигнала обнаружения с 1 на 0, заданный крутящий момент снова используется в качестве входного воздействия на АД. При этом никаких существенных отклонений от номинальной частоты вращения МОД не происходит.

На рис. 1 изображена блок-схема включения электрической машины, работающей на один вал с главным двигателем, с целью создания системы, которая учитывает:

- гидрометеорологические условия;
- характеристики работы вала;
- динамику вала;
- динамику двигателя;
- потери топлива.

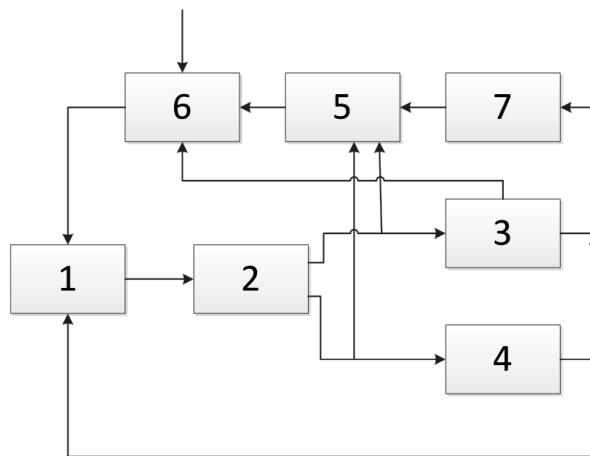


Рис. 1. Блок-схема комбинированного пропульсивного комплекса МОД-АД с системой контроля гидрометеорологических условий: 1 — регулятор оборотов; 2 — ограничитель крутящего момента; 3 — блок, учитывающий динамику АД; 4 — блок, учитывающий динамику МОД; 5 — анализатор; 6 — блок гидрометеорологических условий; 7 — блок расчета потерь топлива

Контроллер гидрометеорологических условий определяет внешние воздействия на пропульсивный комплекс и обеспечивает перераспределение нагрузки между МОД и электрической машиной в соответствии с изменением погодной ситуации, в результате чего уменьшается износ деталей за счет уменьшения пиков крутящего момента вала и крутящего момента двигателя.

6. Обсуждение результатов исследования повышения эффективности судовой энергетической установки с помощью электрической машины

К основным достоинствам проведенного исследования следует отнести разработку закона управления, обеспечивающего требуемую частоту вращения гребного вала во время хода в зависимости от сложившихся погодных условий, что позволит рационально распределить нагрузку между электрической машиной и МОД во время изменения гидрометеорологических условий с целью уменьшения топливно-энергетических затрат.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке систем управления комбинированных пропульсивных комплексов различной структуры, зависящей от конструкции соединения главного двигателя с электрической машиной.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в учете дополнительных факторов, оказывающих влияние на мощность главного двигателя в изменяющихся условиях плавания.

7. Выводы

1. В результате проведенных исследований изменения мощности главного двигателя при влиянии неблагоприятных гидрометеорологических условий получены математические модели основных элементов комбинированного пропульсивного комплекса.

2. Показано, что использование электрической машины в составе указанного комплекса позволяет уменьшить износ деталей за счет уменьшения пиков крутящего момента вала и крутящего момента вала.

3. Предлагается структура системы управления электрической машиной, позволяющая обеспечить требуемый режим работы главного двигателя, что, в свою очередь, даст возможность выполнить рейс за плановое время.

Литература

1. Зимовец, А. В. Международные транспортные операции [Текст]: конспект лекций / А. В. Зимовец. — Таганрог: ТИУиЭ, 2008. — 235 с.
2. Головинов, С. А. Перспективный метод определения крутящего момента судовых ДВС [Текст] / С. А. Головинов // Труды научной конференции студентов и аспирантов. — СПб.: ИИЦСПГУВК, 2004. — С. 93–98.
3. Фомин, Н. Н. Разработка методики по определению эффективной мощности СДВС для судовых дизелей [Текст] / Н. Н. Фомин, Н. Н. Свистунов, С. А. Головинов // Речной транспорт. — 2005. — № 2. — С. 62–63.
4. Башуров, Б. П. Техническая эксплуатация судовых энергетических установок [Текст]: учеб. пос. / Б. П. Башуров. — Новороссийск: МГА им. адм. Ф. Ф. Ушакова, 2007. — 196 с.
5. Björnstedt, J. Experimental investigation on steady-state and transient performance of a self-excited induction generator [Text] / J. Björnstedt, F. Sulla, O. Samuelsson // IET Generation, Transmission & Distribution. — 2011. — Vol. 5, № 12. — P. 1233–1239. doi:10.1049/iet-gtd.2010.0776
6. Santos, S. P. Y. Synchronous Generator Disturbance Provoked by Induction Motor Starting [Text] / S. P. Y. Santos, E. Delbone, E. F. Carvalho, L. N. Martins // American Journal of Applied Sciences. — 2010. — Vol. 7, № 7. — P. 962–968. doi:10.3844/ajassp.2010.962.968

7. Гершаник, В. И. Метод оптимального управления нагрузкой главного двигателя в рейсе [Электронный ресурс] / В. И. Гершаник. — Режим доступа: \www/URL: http://ev.nuos.edu.ua/en/publication?publicationId=22434
8. Будашко, В. В. Підвищення ефективності передачі потужності в судових дизельних пропульсивних комплексах [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.08.05 / В. В. Будашко. — Одеса: Одеська національна морська академія, 2006. — 175 с.
9. Беляев, И. Г. Автоматизация процессов в судовой энергетике [Текст]: учеб. / И. Г. Беляев и др. — М.: Транспорт, 2000. — 254 с.
10. Wijaya, F. D. A New Induction Generator Voltage Controller Using Controlled Shunt Capacitor, SVC Magnetic Energy Recovery Switch [Text] / F. D. Wijaya, T. Isobe, K. Usuki, J. A. Wiik, R. Shimada // IEEJ Transactions on Industry Applications. — 2009. — Vol. 129, № 1. — P. 29–35. doi:10.1541/ieejias.129.29

УПРАВЛІННЯ ПОТУЖНІСТЮ ГОЛОВНОГО ДВИГУНА З УРАХУВАННЯМ ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИХ УМОВ

В роботі досліджено проблему оптимального управління навантаженням головного двигуна, здійснюваного на основі врахування гідрометеорологічних умов мореплавства. Запропонована в роботі концепція дизель-електрохід створює можливість забезпечити необхідну оперативність управління судновою рушійною установкою в штормових ситуаціях. Дана концепція забезпечує необхідну надійність і безпеку для суден, які часто піддаються змінам погодних умов.

Ключові слова: головний двигун, гідрометеорологічні умови, пропульсивний комплекс, паливно-енергетичні ресурси, електрична машина.

Луковцев Валерій Сергєевич, кандидат технічних наук, доцент, кафедра електрооборудування і автоматики судів, Національний університет «Одеська морська академія», Україна.

Борисенков Євгеній Євгенєвич, аспірант, кафедра електрооборудування і автоматики судів, Національний університет «Одеська морська академія», Україна, e-mail: borisenkov@mail.com.

Гвоздева Ірина Маратівна, доктор технічних наук, професор, кафедра електрооборудування і автоматики судів, Національний університет «Одеська морська академія», Україна.

Луковцев Валерій Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра електрообладнання і автоматики суден, Національний університет «Одеська морська академія», Україна.

Борисенков Євген Євгенович, аспірант, кафедра електрообладнання і автоматики суден, Національний університет «Одеська морська академія», Україна.

Гвоздева Ірина Маратівна, доктор технічних наук, професор, кафедра електрообладнання і автоматики суден, Національний університет «Одеська морська академія», Україна.

Lukovtsev Valery, National University «Odessa Maritime Academy», Ukraine.

Borisenkov Evgeniy, National University «Odessa Maritime Academy», Ukraine, e-mail: borisenkov@mail.com.

Hvozdeva Irina, National University «Odessa Maritime Academy», Ukraine