

УДК 621.436+621.31:625.5.035

Будашко В.В.,
НУ «ОМА»

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЕНСАЦИИ ДЕГРАДАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В КОМБИНИРОВАННОМ ПРОПУЛЬСИВНОМ КОМПЛЕКСЕ

Постановка проблемы и анализ последних исследований и публикаций. Судовые энергетические установки (СЭУ) комбинированных пропульсивных комплексов (КПК) обычно состоят из 6÷10 мощных двигателей подруливающих устройств (ПУ) различных конструкций в зависимости от расположения на судне для позиционирования, которые питаются от 4÷6 высоковольтных синхронных генераторов (СГ) [1]. Критерий эффективности процесса электромеханического преобразования энергии в подобных СЭУ рассмотрен в [2] и предполагает дальнейшее развитие оценки передачи мощностей в КПК с трехфазными асинхронными электродвигателями (АД), расположенными на линии вала с винтом фиксированного шага (ВФШ).

Процессы передачи мощности в таких КПК моделируются на основе схем распределения электроэнергетических потоков для главного электропривода, цепей силовых преобразователей с интеграцией в модель энергетических потоков КПК.

Суммарные энергетические потери состоят из переменных v и условно-постоянных k , по аналогии с теорией электропривода, с учетом не только активных, но и полных мощностей, что позволяет исследовать реактивные составляющие мощностей, с расчётом потерь, основываясь на полной мощности [3].

Качественная оценка электроэнергетической системы в целом в зависимости от изменяющихся характеристик СЭУ, КПК и внешних условий проводится по интегральному критерию эффективности преобразования энергии:

$$H_{\text{пр}} = \frac{\int_0^T |P_{\text{вых}}(t)| dt}{\int_0^T |P_{\text{вых}}(t)| dt + \sum_{j=1}^n \int_0^T \Delta P_j(t) dt}, \quad (1)$$

где $|P_{\text{вых}}(t)|$ - модуль мгновенной мощности на выходе, передающейся через энергетический канал, то есть мощность на валу

ВФШ; ΔP_j – потери в j -м элементе канала передачи мощности; n – число элементов, в которых учитываются потери.

Критерий позволяет принять решение при варьировании любых существенных параметров СЭУ КПК, которые обеспечивали бы повышение энергетической эффективности, в связи с чем, если адекватность математических моделей обеспечена, критерий можно считать объективным и применять его для оценки повышения эффективности передачи мощности в данном КПК с АД на линии вала.

В стационарном движении судна с КПК сопротивление телу движущегося равно тяге, но в общем случае сопротивление движению R и тяга T не обязательно должны быть равны и противоположны, а судно при этом может ускоряться и реагировать на другие внешние силы.

В таком случае коэффициенты, учитывающие уменьшение тяги, могут быть определены с помощью замены сопротивления соответствующими усилиями для всех трех плоскостей движения (*surge*, *sway*, *yaw*) [4]:

$$C_{F_{Lh}} = \frac{F_L(V, n) - T_{ux}(V, n) - F_L(V, 0)}{T_u(V, n)}, \quad (2)$$

$$C_{F_{Th}} = \frac{F_T(V, n) - T_{uy}(V, n) - F_T(V, 0)}{T_u(V, n)}, \quad (3)$$

$$C_{N_h} = \frac{N(V, n) - T_{uy}(V, n)X_p - T_{ux}(V, n)Y_p - N(V, 0)}{T_{uy}(V, n)X_p - T_{ux}(V, n)Y_p}, \quad (4)$$

где: $FL(V, n)$, $FT(V, n)$ и $N(V, n)$ – общие силы (Н), действующие на судно при условии отсутствия других внешних возмущений при скорости потока v (м/с) и соответствующего числа оборотов ВФШ n (об/мин);

$FL(V, 0)$, $FT(V, 0)$ и $N(V, 0)$ – соответствующие силы (Н) в случае неработающего винта (например, течение);

$T_{uy}(V, n)$ и $T_{ux}(V, n)$ – тяги (Н) по соответствующим осям относительно плоскости движения.

Эти коэффициенты, которые дальше будут именоваться, как коэффициенты эффективности двигателя могут быть рассчитаны при условии, что индуцированные силы, которые определяются соответствующими числителями, связаны с системой распределения давле-

ния на корпус, что обусловлено расположением приводов винтов в непосредственной близости от корпуса.

Для тягового усилия предоставленные выше коэффициенты остаются определяющими и предполагают тот же смысл. Для случая нулевой тяги (как правило, для небольшого значения n) коэффициенты определены нечетко, не столь существенно, так как эти условия являются менее актуальными для решения поставленной задачи.

Более значимыми являются выражения знаменателей с точки зрения тяги в направлениях рассматриваемой плоскости, то есть для тяги в x -направлении. Тем не менее, в некоторых случаях это приводит к плохо определяемым коэффициентам, в результате того, что продольная сила может вызываться и без наличия продольной тяги [5].

Нерешенными проблемами остаются: во-первых – вышеуказанные критерии и соответствующие им коэффициенты нельзя применить для оценки потребляемой электроэнергии при подключении уже вращающегося АД к энергетической сети, поскольку на сегодняшний день нет таких математических моделей, которые бы подходили к этому процессу; во-вторых – параметры, входящие в формулу (1) зависят не только от времени, но, например, от силы и направления ветра, колебания оси вала, отклонений заданных и измеренных параметров и т.д.; в-третьих – критерии должны учитывать также неточности измерения самых значений мгновенных мощностей на выходе каждого элемента модели, причем, способы измерения в каждом отдельном случае могут быть разными.

Целью статьи является оценка энерго-эффективности КПК с трехфазными частотно-управляемыми АД на линиях валов и формулировка критерия, или критериев такой оценки при попытке решить проблему учета влияния деградиционных эффектов (таких, например, как эффект Коанда [6]) на работу АД азимутальных ПУ СЭУ КПК.

Изложение основного материала. Уравнения (1÷4) можно применять для такой оценки, при условии учета всех вышеуказанных ограничений, а также, что значения мощностей АД в некоторых режимах работы судна зависят от мощности СЭУ в целом и могут принимать отрицательные значения относительно мощности последней.

При этом критерий эффективности (1) удовлетворяет поставленной задаче, за исключением того, что в ходе исследования эффективности мощностного трансфера от АД к ВФШ по линиям валов, этот

критерий необходимо будет дополнить составляющими, которые бы свидетельствовали об экономии топлива, уменьшении колебаний мощности, а отсюда и динамических механических нагрузок на линии вала до двигателя.

При выполнении количественной оценки критерия эффективности с АД на линии вала в СЭУ КПК, учитывалось то, что АД, работающий при снижении нагрузки до 0,8 номинального значения имеет коэффициент эффективности, который лежит в пределах $0,7 \div 0,8$ от номинального.

Исходя из формулы расчёта мощности АД, непосредственно переданной к винту:

$$P_{\text{АД}} = \eta_{\text{ТРМ}} \cdot 2\pi \cdot Q_{\text{АД}} \cdot n, \quad (5)$$

где: $\eta_{\text{ТРМ}}$ – КПД трансмиссии, $Q_{\text{АД}}$ – момент на валу АД, Нм, и учитывая выражения (1) – (4), найдём выражение для расчёта коэффициентов эффективности АД на линии вала под воздействием возмущающих сил в определённой плоскости, где эти силы являются преобладающими.

Например, для плоскости *surge*, получим:

$$H_{\text{пр_surge}} = \eta_{\text{ТРМ}} \frac{\int_0^L (|(Q_{\text{АД}_{F_L}}(l) - Q_{\text{АД}_{ux}}(l))n| - Q_{\text{АД}_{F_L}}) dl}{\int_0^L (|(Q_{\text{АД}_{F_L}}(l) - Q_{\text{АД}_{ux}}(l))n| - Q_{\text{АД}_{F_L}}) dl + \sum_{j=1}^n \int_0^L \Delta Q_j(l) dl}.$$

Аналогично получим выражения для расчёта эффективности АД для двух других плоскостей:

$$H_{\text{пр_sway}} = \eta_{\text{ТРМ}} \frac{\int_0^T (|(Q_{\text{АД}_{F_T}}(t) - Q_{\text{АД}_{uy}}(t))n| - Q_{\text{АД}_{F_T}}) dt}{\int_0^T (|(Q_{\text{АД}_{F_T}}(t) - Q_{\text{АД}_{uy}}(t))n| - Q_{\text{АД}_{F_T}}) dt + \sum_{j=1}^n \int_0^T \Delta Q_j(t) dt},$$

$$H_{\text{пр_yaw}} = \eta_{\text{ТРМ}} \frac{\iint_{XY} |(Q_{\text{АД}_{N}}(t) - Q_{\text{АД}_{uy}}(t)) - Q_{\text{АД}_{ux}}(t)n|}{\iint_{XY} |(Q_{\text{АД}_{N}}(t) - Q_{\text{АД}_{uy}}(t)) - Q_{\text{АД}_{ux}}(t)n| + \sum_{X=Y}^X \iint_{XY} \Delta Q_{XY}(t) dt} dt$$

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\iint_{XY} Q_{АД,T} dt}{\iint_{XY} |(Q_{АД,N}(t) - Q_{АД,uy}(t)) - Q_{АД,ux}(t)|n + \sum_{X=Y}^X \iint_{XY} \Delta Q_{XY}(t) dt} \\ & \frac{Q_{АД,N} dt}{\iint_{XY} |(Q_{АД,N}(t) - Q_{АД,uy}(t)) - Q_{АД,ux}(t)|n + \sum_{X=Y}^X \iint_{XY} \Delta Q_{XY}(t) dt} \end{aligned} \right\} (6-8)$$

Эффективность АД на линии вала ВФШ при воздействии возмущающих воздействий во всех трёх плоскостях, определяется как средневзвешенное значение за период не меньший, чем период самого кратковременного возмущения.

Оценка проводилась в виртуальной лаборатории *MatLab* при различных условиях загрузки судна, частоте вращения вала и различных принципах управления частотным преобразователем (ПЧ) на линии СГ–ПЧ–АД–ВФШ.

На рис. 1 приведены графики изменения эффективности АД СЭУ КПК при передаче мощности к ВФШ.

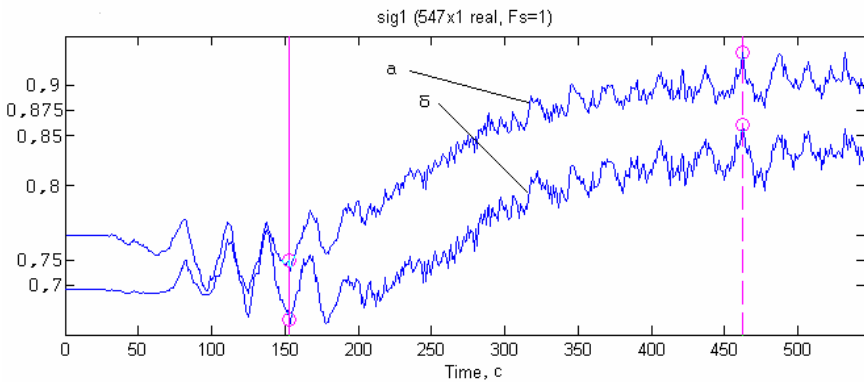


Рис. 1 Зависимость эффективности АД СЭУ КПК в течение времени 500 с: а – с компенсацией эффекта Коанда; б – без компенсации эффекта Коанда.

Результаты расчётов сводим в таблицу 1.

Делаем вывод, что применение интегрального критерия позволяет адекватно оценить эффективность АД на линии вала ВФШ в СЭУ

КПК при компенсации эффекта Коанда, что косвенно приводит к экономии топлива во всем диапазоне регулирования оборотов.

Количественная оценка эффективности передачи мощности в СЭУ КПК от АД азимутальных ПУ к ВФШ показала экономию топлива во всем диапазоне регулирования оборотов АД в пределах от 4,22 до 5,34 г/кВт·час.

Таблица 1. Количественные показатели эффективности СЭУ КПК

Частота вращения, об/мин Параметры СЭУ КПК	$H_{пр}$					
	Компенсация эффекта Коанда, $u/f = const$			Без компенсации, $u/f^2 = const$		
	$H_{пр_surge}$	$H_{пр_sway}$	$H_{пр_yaw}$	$H_{пр_surge}$	$H_{пр_sway}$	$H_{пр_yaw}$
260÷280	0,5322	0,4154	0,5287	0,4241	0,3627	0,3845
160÷190	0,5016	0,32835	0,4396	0,3658	0,3254	0,3475
Экономия топлива, г/кВт·час.	4,22 ÷ 5,34			3,45 ÷ 4,12		

Выводы

При передаче энергии от СГ к АД в СЭУ КПК на линии СГ–ПЧ–АД–ВФШ вследствие надсинхронного регулирования оборотов АД возникает синхронизирующий момент, что обеспечивает устойчивость объекта с саморегулированием в пределах 5% от номинального значения.

Дальнейшие исследования будут проводиться в направлении создания универсальных математических моделей СЭУ КПК с гибкой комплектацией для судов разных типов, работающих в различных погодных и климатических условиях. Предполагается получить

обобщённую математическую модель АД на линии СГ–ПЧ–АД–ВФШ с комбинаторными коэффициентами учёта влияния окружающей среды и средневзвешенными коэффициентами эффективности, учитывающими максимум деградационных эффектов, возникающих на линии валов вследствие изменяющихся эксплуатационных условий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будашко В.В. Удосконалення системи управління підрулюючим пристроєм комбінованого пропульсивного комплексу / В.В. Будашко, О.А. Онищенко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 38 (1081). – С. 45-51 [Электронный ресурс]. URL: http://library.kpi.kharkov.ua/Vestnik/2014_38.pdf (дата обращения: 1.07.2015).
2. Woud H.K., Stapersma D.. Design of propulsion and electric power generation systems / H.K. Woud, D. Stapersma // IMarEST publications: London. – 2003. – 494 p.
3. Будашко В.В. Математические основы имитационного моделирования системы управления энергетической установкой бурового судна // В.В. Будашко, О.А. Онищенко // Вестник Камчатского государственного технического университета. – Петропавловск-камчатский: КамчатГТУ. – 2014. – Вып. 29. – С. 6-13. [Электронный ресурс]. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22822710> (дата обращения: 01.07.2015).
4. Dang J. Hydrodynamic Aspects of Steerable Thrusters / J. Dang, H. Laheij // Dynamic Positioning Conference. – Wartsila Propulsion Netherlands BV. – September 28-30, 2004. – 33 p.
5. Veksler A. Optimization-based control of diesel-electric ships in dynamic positioning / A.Veksler / Thesis for the degree of philosophiae doctor. – Trondheim, NTNU. – 2014. – 139 p.
6. Christiaan de Wit. Optimal Thrust Allocation Methods for Dynamic Positioning of Ships / de Wit Christiaan // A thesis submitted to the Delft Institute of Applied Mathematics in partial fulfillment of the requirements. – Delft, the Netherlands: Delft University of Technology. – 2009. – 68 p.