

В.В. Будашко

**ИМПЛЕМЕНТАРНЫЙ ПОДХОД ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДИНАМИЧЕСКИ ПОЗИЦИОНИРУЮЩЕГО СУДНА**

*У результаті аналізу енергетичних процесів у судових енергетичних установках комбінованих пропульсивних комплексів в різних експлуатаційних режимах створена стратегія побудови математичних моделей зазначених комплексів. Стратегія заснована на імплементації векторів збурюючих впливів, які змінюють гідродинамічні характеристики судна на векторну площину енергетичних характеристик. Запропонований підхід до моделювання енергетичної установки судна, яке знаходиться у режимі динамічного позиціонування, дозволив врахувати: а) особливості налаштувань ПИД-регуляторів частотних електроприводів підрулюючих пристроїв; б) автоматичних регуляторів напруги середньо-оборотних дизель-генераторів; в) експлуатаційні характеристики всіх керованих об'єктів комплексу й судна при передачі потужності до гребних гвинтів. Бібл. 10, рис. 7.*

*Ключові слова:* суднова енергетична установка, комбінований пропульсивний комплекс, динамічне позиціонування, математичне моделювання, електропривод, передача потужності, ефективність, регулювання.

*В результате анализа энергетических процессов в судовых энергетических установках комбинированных пропульсивных комплексов в различных эксплуатационных режимах создана стратегия построения математических моделей указанных комплексов. Стратегия основана на имплементации векторов возмущающих воздействий, изменяющих гидродинамические характеристики судна, на векторную плоскость энергетических характеристик. Предложенный подход к моделированию энергетической установке судна, находящегося в режиме динамического позиционирования, позволил учесть: а) особенности настроек ПИД-регуляторов частотных электроприводов подруливающих устройств; б) автоматических регуляторов напряжения среднеоборотных дизель-генераторов; в) эксплуатационные характеристики всех управляемых объектов комплекса и судна при передаче мощности к гребным винтам. Библ. 10, рис. 7.*

*Ключевые слова:* судовая энергетическая установка, комбинированный пропульсивный комплекс, динамическое позиционирование, математическое моделирование, передача мощности, эффективность, регулирование.

**Введение.** Растущий спрос на мощные судовые дизель-электрические комбинированные пропульсивные комплексы (КПК) и потребность в применении типовых решений в условиях эксплуатационной неопределенности для многих задач мореплавания, приводят к возрастанию сложности конструкций судовых энергетических установок (СЭУ) [1]. Такое усложнение увеличивает вероятность их частичного или полного обесточивания в различных эксплуатационных режимах и погодных условиях, что может привести к непредсказуемым последствиям для судна и экипажа. Структуры известных СЭУ – это многошинные конструкции с неравномерным распределением импеданса, которые строятся по технологии гибких (управляемых) систем переменного тока (FACTS – Flexible Alternative Current Transmission Systems) и представляют собой единые электроэнергетические системы (WSCC – Western System Coordinating Council). Подчеркнем, что: а) в отличие от береговых электроэнергетических систем, где обесточивание, например, может привести к социальному взрыву, в автономных электроэнергетических системах обесточивание связано с безопасностью людей [2]; б) современные тенденции развития и организации СЭУ по технологии FACTS направлены на увеличение живучести судов. Существенные отклонения от номинальных параметров СЭУ КПК в сложных эксплуатационных режимах приводят к непредвиденным косвенным потерям и разрушению жизненно важных судовых инфраструктур [3].

СЭУ КПК, при воздействии на судно внешних факторов и изменяющихся в связи с этим эксплуатационных условий, могут демонстрировать разнообразные нелинейные поведения. В свою очередь, при эксплуатации подобных КПК, реакции на возмущения

могут соответствовать, как нормальному, так и аномальному или аварийному (предаварийному) режимам, что заставляет разработчиков искать пути по снижению негативных последствий, а в идеале – по их предотвращению [4]. Оценивая риски выхода КПК из стабильного состояния при внешних возмущениях, возникает необходимость прогноза его поведения в обычных и нормальных условиях при помощи средств моделирования.

**Постановка задачи.** Судовой дизель-электрический КПК имеет зоны энергетически оптимальных настроек систем управления в зависимости от конкретных эксплуатационных условий. Стандартным способом обеспечения качества динамических режимов КПК является коррекция параметров системы «судно – винты – асинхронные (АД), синхронные двигатели (СД) – преобразователи частоты (ПЧ), циклоконвертеры (СЦ) – среднеоборотные дизель-генераторы (СОДГ)». Учитывая, что упор винта фиксированного шага (ВФШ) определяется режимом работы судна и не может быть изменён в необходимую сторону, единственным способом обеспечения необходимого качества процессов управления остаётся оптимизация настроек регуляторов частоты вращения АД и СОДГ, максимально удовлетворяющая основным эксплуатационным режимам [7].

В известных моделях СЭУ КПК с нестабильным напряжением на шинах и малыми расстояниями между потребителями обычно пренебрегают параметрами судовой сети. При соизмеримых по мощности генераторах и потребителях, акцент ставится на создание динамических моделей энергетических систем, встраиваемых в систему управления. Однако интеллектуальные системы управления электродвигателями

© В.В. Будашко

КПК, самонастраивающиеся (фазы, фазы-нейро, нейро) ПИД-регуляторы различных параметров [8] только начинают завоевывать свои позиции в СЭУ.

Таким образом, для оценки и повышения эффективности передачи мощности в дизель-электрической СЭУ КПК целесообразно создание и применение в системе управления модели, основанной на нейронных сетях с применением принципа «добычи данных» (data mining), базирующегося на DMI-моделях отдельных компонентов комплекса [5]. Если рассматривать КПК как гибкую систему, состоящую из некоторого числа взаимозаменяемых компонентов, то задачей исследования является построение такой модели динамики КПК, которая обладала бы прогнозирующими свойствами, и легко встраивалась в известные системы управления [6].

**Целью статьи** является постановка и решение задачи создания математической модели СЭУ КПК, учитывающей динамику всех ее объектов, в том числе и судна, в режимах передачи мощности от СОДГ на гребные винты, отличающейся от известных моделей учетом изменяющихся гидродинамических свойств судна с возможностью оценки их влияния на энергетические процессы в СЭУ КПК.

В результате анализа схемы (рис. 1), можно показать, что в установившемся режиме работы судна, когда изменение направления вектора движения определяется внешними возмущениями, применение частично инвариантных к основным возмущениям регуляторов частоты и напряжения на шинах СОДГ позволит включить «интегральную составляющую управления» на всех участках распределительных щитов, что гарантирует равномерную загрузку (астатизм) всех параллельно-подключённых СОДГ.

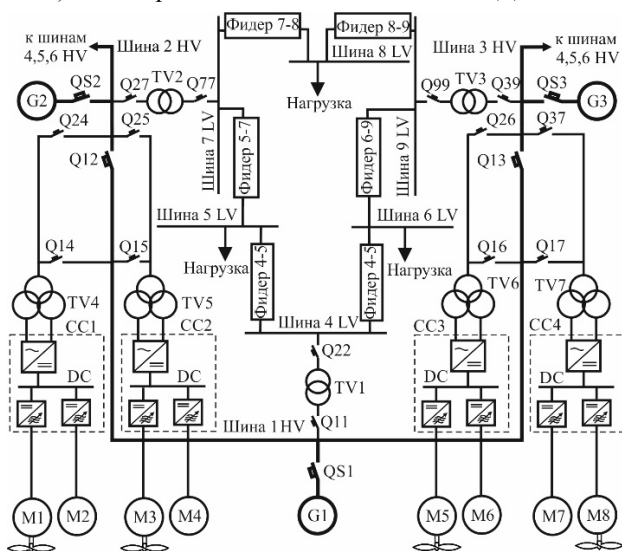


Рис. 1. Фрагмент однолинейной схемы единой многошинной электроэнергетической системы оффшорного (supply vessel) судна: G1-G3 – высоковольтные СОДГ; QS1-QS3 – генераторные автоматы; Q12-Q99 – автоматические шинные выключатели; TV1-TV3 – понижающие трансформаторы; TV4-TV7 – понижающие трёх-обмоточные трансформаторы (Y/Δ/Y); M1-M8 – АД подруливающих устройств (ПУ) и грузовых насосов; CC1-CC4 – преобразователи частоты со звеном постоянного тока (DC); HV (high voltage) – высокое напряжение (3,3 ≤ HV ≤ 11 kV); LV (low voltage) – низкое напряжение (220 ≤ LV ≤ 690 V)

Для судов с подобными СЭУ характерным является эксплуатационный режим работы с удержанием позиции судна в заданной точке – режим динамического позиционирования (dynamic position – DP). С целью обеспечения живучести судна, режим DP, когда радиус-вектор движения является определяющим фактором загрузки СЭУ, последняя предполагает необходимость подключения к судовой сети «двигательной нагрузки» в точки с различным импедансом. Это связано с тем, что силовые агрегаты СЭУ координатно рассредоточены по всему судну. Следует помнить, что переход гребного электродвигателя из режима работы на «свободной воде» в режим стоянки под током, предполагает использование всережимных регуляторов оборотов [9].

В зависимости от точки подключения, пространственный вектор потребляемого гребным электродвигателем (АД или СД) тока будет вращаться в  $dq$ -координатах с частотой, определяемой фазой нагрузки, которая в свою очередь, зависит от разности импеданса в точке подключения и ближайшей высоковольтной шины СОДГ (рис. 2).

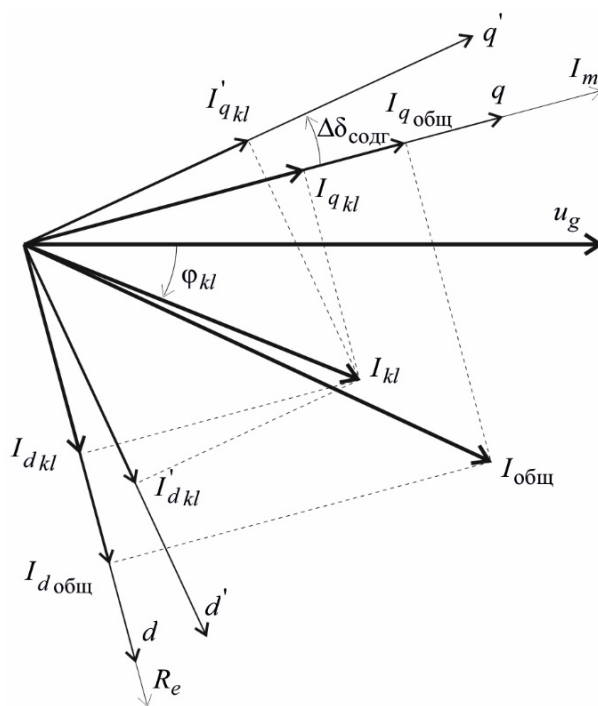


Рис. 2. Векторная диаграмма для участка  $kl$  ( $k, l$  – натуральное число) высоковольтной шины с подключёнными к ней АД и СОДГ:  $u_g$  – напряжение на шинах, о.е.;  $I_{общ}$  – общий потребляемый АД ток, о.е.;  $\Delta\delta_{СОДГ}$  – угол нагрузки;  $\varphi_{kl}$  – фаза тока статора АД

Уравнения модели одного СОДГ, подключённого к шинам, можно описать системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\psi}{dt} = (W(n) + FX^{-1})\psi + Nu_g + gu_f; \\ \frac{dn}{dt} = \frac{1}{t}(t_{m\_СОДГ} - \psi^t(M^t KM)X^{-1}\psi); \\ \Delta \frac{d\delta}{dt} = \omega_N(n - n_1), \end{cases} \quad (1)$$

где  $\psi$  – вектор потокосцепления обмотки статора;  $u_f$  – напряжение возбуждения, о.е.;  $n$  – частота вращения

вала генератора, о.е.;  $\delta$  – угол нагрузки, рад;  $\omega_N$  – номинальная электрическая угловая скорость, рад/с;  $r_{ss}$  – сопротивление обмотки статора АД, о.е.;  $r_{lk}$  – сопротивление шины между точками  $lk$ , о.е.;  $T_d, T_q$  – продольная и поперечная составляющие постоянной времени демпферной обмотки СОДГ, с;  $t_f$  – постоянная времени обмотки возбуждения, с;  $x_d, x_q$  – продольная и поперечная составляющие значения реактивного сопротивления рассеяния обмоток статора, о.е.;  $k_{ud}, k_{uq}, k_{uf}$  – продольная и поперечная составляющие значения коэффициента насыщения демпферной и статорной обмоток СОДГ и обмотки возбуждения;  $\mu_d, \mu_f$  – коэффициенты взаимоиндукции между обмоткой статора и демпферной, между обмоткой возбуждения и демпферной,

$$W(n) = \begin{bmatrix} 0 & \omega_N n & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_N n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad N = \begin{bmatrix} \omega_N & 0 \\ 0 & \omega_N \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$F = \begin{bmatrix} \omega_N (r_{ss} + r_{kl}) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_N (r_{ss} + r_{kl}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/t_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/t_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/t_f \end{bmatrix};$$

$$X = \begin{bmatrix} -x_d & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -x_q & 0 & 1 & 0 \\ -(1-k_{\mu_d})x_d & 0 & 1 & 0 & \mu_d \\ 0 & -(1-k_{\mu_q})x_d & 0 & 1 & 0 \\ -(1-k_{\mu_f})x_d & 0 & \mu_f & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$g = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{t_f} \end{bmatrix}^t.$$

Тогда, из выражения (1), вектор потокосцепления  $\psi$  СОДГ связан с величинами, характеризующими обмотку статора выражением:

$$h(\psi) = \psi_s^t K i_s = \psi^t (M^t K M) X^{-1} \psi, \quad (2)$$

где

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}; \quad M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$M^t K M = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Совместное решение выражений (1) и (2) позволяет определить постоянные интегрирования, характеризующие уставки ПИД-регуляторов СОДГ при их параллельной работе. Регуляторы настраиваются так, что один из регуляторов контролирует частоту и напряжение, а другой поставляемые активную и реактивную мощности с уставками, взятыми относительно

мощности первого генератора. Таким способом достигается равномерное распределение нагрузки:

$$c = x_d (\mu_f (\mu_d + k_{\mu_d} - 1) - \mu_d + 1 - k_{\mu_d} + k_{\mu_f} (k_{\mu_q} - 1)).$$

Значения тока статора  $i_s$ , активной ( $P$ ) и реактивной ( $Q$ ) мощностей находятся из выражений:

$$\begin{cases} i_s = MX^{-1}\psi; \\ P = u_g^t i_s = u_g^t MX^{-1}\psi; \\ Q = -u_g^t K i_s = -u_g^t K MX^{-1}\psi. \end{cases} \quad (3)$$

В случае увеличения общей нагрузки, подключённый на параллельную работу генератор в начальный момент, соизмеримый с постоянными времени СОДГ, может автоматически «взять на себя» весь излишек затребованной потребителями мощности. Это связано с тем, что, остальные генераторы, работающие в установившемся режиме, будут поставлять постоянные мощности в зависимости от уставок, что может привести к неожиданному рассогласованию нагрузки между генераторами. Во избежание такого рассогласования, в зависимости от потребляемого тока и из расчёта расхождения между мощностью конкретного генератора и подключённого, блок распределения нагрузки, путём воздействия на ПИД-регуляторы СОДГ по частоте вращения и напряжению, устранил возникшее рассогласование.

На судах с 6-8 ПУ, для устранения деградиционных эффектов, таких, например, как эффект Коанда, возникающих вблизи корпуса судна, АД, работающие в зоне надсинхронных частот, получают питание от преобразователей с системами импульсно-фазового управления (СИФУ). В таких системах вместо распределения управляющих сигналов по фазам, осуществляется их одновременная подача на электроды силовых коммутаторов. Если применить синхронизацию по любой из фаз с необходимой скважностью, то за счет действия таких СИФУ расширяется зона устойчивого регулирования, практически до максимально-возможных пределов ( $0^\circ < \alpha < 180^\circ$ ). Экспериментально доказано, что такой эффект достигается одновременным использованием современных безынерционных, например – пьезоэлектрических, датчиков, практически мгновенно реагирующих на отклонение упора ПУ от рассчитанных значений.

Угол управления  $\alpha$ , который в указанных зонах является углом открытия, в случае превышения значения  $\pi$ , становится углом управления интенсивностью нарастания упора в квадратичной зависимости. Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) здесь становится средством сглаживания пульсаций, потому что является составляющей звена постоянного тока (DC), половина уровня напряжения на котором определяется следующим образом:

$$U_{dc\_N} = \frac{1}{\text{modind\_N}} \cdot \frac{U_m \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (B), \quad (4)$$

где  $U_m$  – максимальное значение линейного напряжения питания;  $\text{modind\_N} = 1,01$  – значение случайной величины оптимальных углов переключения, как функции индекса модуляции для устранения нечётных гармоник из основной.

Генерация импульсов управления, с точки зрения получения синусоидальной формы напряжения на АД, повысит эффективность передачи мощности к винту и выходит из основной формы волны выходного напряжения ПЧ:

$$U(\varphi - \alpha, (t - t_{\text{ПЧ}})/s) = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{U_{DC-N}}{2} \cdot \sum_{j=1,3,5,\dots} \frac{1}{j} \cdot \sin(j \cdot \frac{\pi}{2}) [\cos(j(\omega \times ((t - t_{\text{ПЧ}})/s) + (\varphi - \alpha))) + \cos(j(\omega((t - t_{\text{ПЧ}})/s) - (\varphi - \alpha)))]$$

где  $\varphi$  – фаза выходного напряжения;  $j$  – номер гармоники выходного напряжения;  $s$  – необходимая скважность выходного напряжения, которая зависит от интенсивностей задачи упора ( $T$ ) или момента винта ( $M$ ), а значит и потребляемой АД активной мощности  $P$ .

Блок-схема регулятора мощности с ограничением частоты вращения АД на свободной воде показана на рис. 3.

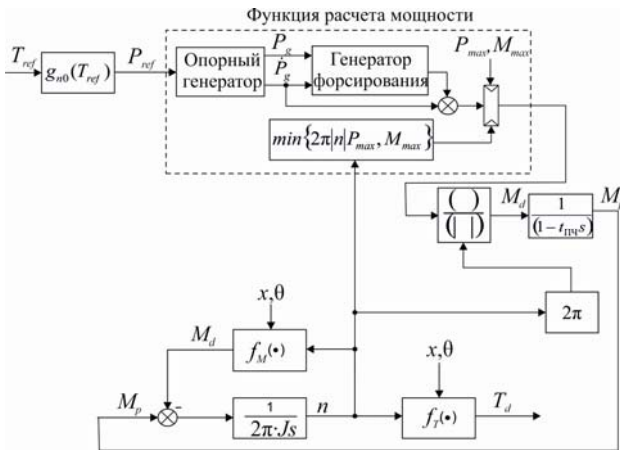


Рис. 3. Блок-схема регулятора мощности АД ПУ:

$T_{ref}$  – заданный упор винта, Н;  $M_{ref}$  – момент на валу, Нм;  $g_{T0} = DK_{M0}/K_{T0}$ ;  $D$  – диаметр винта, м;  $K_M$  – коэффициент приведения момента к валу;  $K_T$  – коэффициент упора винта;  $K_{M0} = K_M (\lambda = 0, \text{ относительная поступь винта});$   $K_{T0} = K_T (J \approx 0, \text{ момент инерции вала})$

**Результаты исследований.** Моделирование проведено с помощью среды MatLab/Simulink в программном комплексе Ships\_CPC, разработанном в рамках научно-исследовательской государственной работы «Концепции, технологии и направления совершенствования судовых энергетических установок комбинированных пропульсивных комплексов» Одесской национальной морской академии.

Программный комплекс представляет собой совокупность функциональных блоков компонентов СЭУ КПК, построенных по классическому принципу «вход-выход». Например, исходя из системы уравнений (3) и рис. 3, выходами функциональных блоков АД являются зависящие от напряжения (5) значения упора  $T$  и момента  $M$ , которые, в свою очередь, в зависимости от того движется судно (рис. 4) или динамически позиционирует (рис. 5), поступает на вход (входы) модели судна.

Например, если СЭУ КПК работает в режиме DP, модель судна ( $m$ -файл) генерируется с помощью компьютерного приложения WAMIT (Wave Analysis Massachusetts Institute of Technology) [10]. Модель представляет собой функциональный блок, связывающий между собой вектор  $\tau_{au}$  результирующего

упора (например, от шести АД ПУ с тремя степенями свободы – 3 Degrees of Freedom (DOF) control vector) с выходными параметрами динамически позиционирующего судна:  $u$  – скорость продольного перемещения, м/с;  $v$  – скорость поперечного перемещения, м/с;  $r$  – скорость рыскания, рад/с;  $x$  –  $x$ -позиция, м;  $y$  –  $y$ -позиция, м;  $psi$  – угол рыскания, рад (рис. 5).

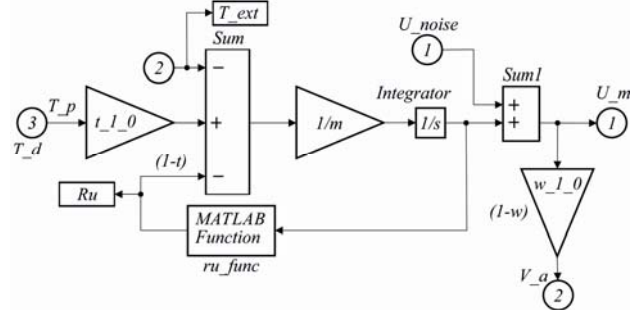


Рис. 4. Модель динамики судна:  $T_d$  – упор гребного винта;  $t_{1\_0} = 1 - t =$  среднее значения коэффициента изменения упора за винтом (thrust deduction), о. е., идентифицированные для конкретной физической модели судна;  $T_{ext}$  – упор внешней возмущающей силы (External Force);  $m$  – суммарная масса судна (с учетом массы груза);  $U_{noise}$  – отклонение (“шум”) оцененной скорости судна;  $Ru_{func}$  – функция расчёта сопротивления движению судна ( $Ru$ );  $w_{1\_0} = 1 - w =$  среднее значение коэффициента попутного потока (wake fraction), о. е. для соответствующей модели судна;  $U_m$  – скорость судна

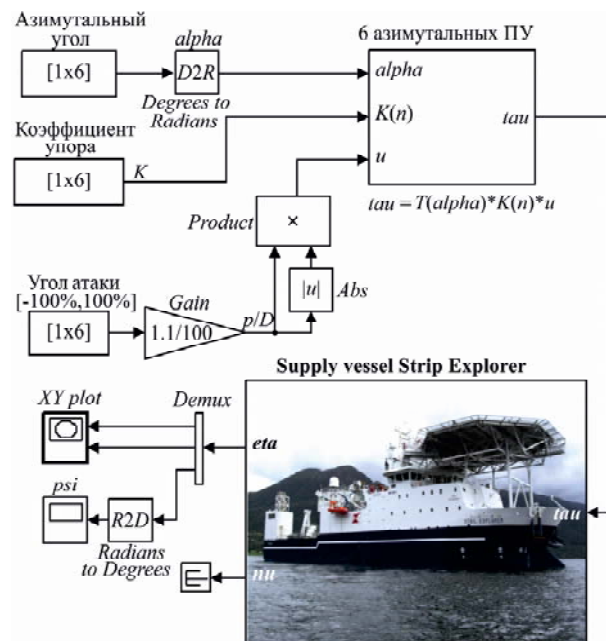


Рис. 5. Модель динамически позиционирующего оффшорного судна:  $\alpha$  – азимутальный угол положения ПУ относительно центра тяжести судна в диаметральной плоскости;  $K$  – коэффициент упора ПУ;  $p/D$  – задание шага винта, в случае применения ВФШ  $p = 100\%$ ;  $XY plot$  – построение местоположения судна относительно точки DP;  $psi$  – угол рыскания

На рис. 6, 7 представлены результаты моделирования энергетических процессов, протекающих в СЭУ КПК, представленной на рис. 1 при условии работы 4-х дизель-генераторных установок и 4-х азимутальных ПУ для судна типа Supply vessel, совершающего динамическое позиционирование.

На 55 секунде моделирования происходит «запрос» мощности от системы управления электродвигателями азимутальных ПУ вследствие возникшего возмущающего воздействия. Кратковременное превышение общей потребляемой электродвигателями ПУ мощности более 100 % приводит к запуску резервного генератора. Последующее уменьшение запроса мощности (130 с) позволяет системе распределения нагрузки (PMS) перевести один генератор в «горячий резерв», а второй в режим работы на гиперболе постоянной мощности.

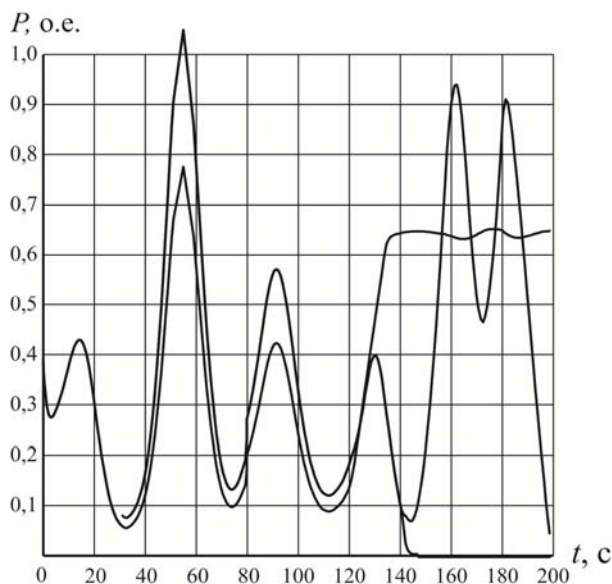


Рис. 6. Характеристики потребляемой активной мощности 4-мя генераторами СЭУ КПК

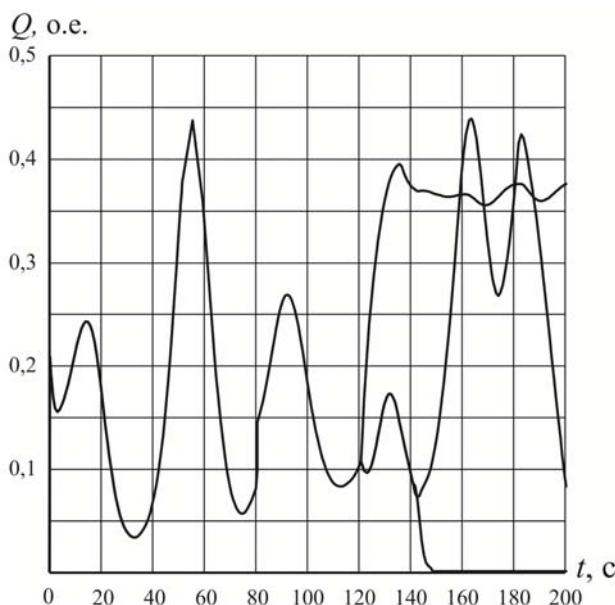


Рис. 7. Характеристики потребляемой реактивной мощности 4-мя генераторами СЭУ КПК

### Выводы

1. Предложенная концепция построения математической модели СЭУ КПК, учитывающей динамику всех ее объектов, в том числе и судна в режимах передачи мощности от СОДГ на гребные винты, подтвердила свою работоспособность с помощью программного комплекса Ships\_CPC.

2. Исследование влияния настроек основных регуляторов системы управления на энергетические процессы в СЭУ КПК, подтвердило широкие возможности разработки и применения различных эффективных стратегий функционирования систем стабилизации напряжения СОДГ.

3. Программный комплекс Ships\_CPC разрабатывался по технологии Open system, что означает его возможность реорганизовываться, перенастраиваться и интегрироваться под технологические процессы управления энергетической системой судна любой сложности с перспективой на завершение в форме универсальной структуры.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Radan D. Integrated control of marine electrical power systems // Thesis for the degree of philosophiae doctor, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology, Trondheim, Norway, 2008. – 231 p. Available at: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:123798/FULLTEXT01.pdf> (accessed 19 September 2015).
2. M.J. Sanjari, O. Alizadeh Mousavi, G.B. Gharehpetian. Assessing the risk of blackout in the power system including HVDC and FACTS devices // International Transactions on Electrical Energy Systems. – 2013. – vol.23. – no.1. – pp. 109-121. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/enhanced/doi/10.1002/etep.1619>. (accessed 21 September 2015). doi: 10.1002/etep.1619.
3. Очеретяный Ю.А., Живица В.И., Белый В.Н., Онищенко О.А., Вайнфельд Э.И. Концепция системы компьютерного мониторинга и технической диагностики рефрижераторной установки судна // Судовые энергетические установки. – 2011. – №28. – С. 5-11.
4. Будашко В.В., Онищенко О.А. Удосконалення системи управління підрулюючим пристроєм комбінованого пропульсивного комплексу // Вісник НТУ «ХП». – 2014. – №38(1081). – С. 45-51.
5. Будашко В.В., Онищенко О.А. Математические основы имитационного моделирования системы управления энергетической установкой бурового судна // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2014. – №29. – С. 6-13.
6. Le Luo, Lan Gao, Hehe Fu. The control and modeling of diesel generator set in electric propulsion ship // International Journal of Information Technology and Computer Science. – 2011. – vol.3. – no.2. – pp. 31-37. Available at: <http://www.mecspress.org/ijites/ijites-v3-n2/IJITCS-V3-N2-5.pdf> (accessed 21 September 2015). doi: 10.5815/ijites.2011.02.05.
7. Будашко В.В., Онищенко О.А., Юшков Е.А. Физическое моделирование многофункционального пропульсивного комплекса // Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса). – 2014. – №2. – С. 88-92.
8. Hansen J.F. Modelling and control of marine power systems // Doktor ingeniør thesis, Norwegian University of Science and Technology, Department of Engineering cybernetics, Trondheim, Norway, 2000. – 119 p. Available at: [http://www.itk.ntnu.no/databaser/dr\\_ing\\_avhandlinger/vedlegg/110\\_pdf.pdf](http://www.itk.ntnu.no/databaser/dr_ing_avhandlinger/vedlegg/110_pdf.pdf) (accessed 21 September 2015).
9. Будашко В.В., Юшков Е.А. Математическое моделирование всережимных регуляторов оборотов подруливающих устройств судовых энергетических установок комбинированных пропульсивных комплексов // Электронное моделирование. – 2015. – Т.37. – №2. – С. 101-114.
10. WAMIT® / User manual // WAMIT, Inc.: Incorporated and Massachusetts Institute of Technology. – 2006. – 394 p. Available at: <http://www.engr.mun.ca/~bveitch/courses/8000/software/wamit/wamit.pdf> (accessed 21 September 2015).

## REFERENCES

1. Radan D. *Integrated control of marine electrical power systems*. Thesis for the degree of philosophiae doctor, Trondheim, Norway, 2008. 231 p. Available at: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:123798/FULLTEXT01.pdf> (accessed 19 September 2015).
2. M.J. Sanjari, O. Alizadeh Mousavi, G.B. Gharehpetian. Assessing the risk of blackout in the power system including HVDC and FACTS devices. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2013, vol.23, no.1, pp. 109-121. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/enhanced/doi/10.1002/etep.1619>. (accessed 21 September 2015). doi: 10.1002/etep.1619.
3. Ocheretianyi Yu.A., Zhivitsa V.I., Belyi V.N., Onishchenko O.A., Vainfel'd E.I. Concept of computer monitoring and technical diagnostics for refrigeration unit of the ship. *Sudovye energeticheskie ustanovki – Ship Power Plants*, 2011, no.28, pp. 5-11. (Rus).
4. Budashko V.V., Onishchenko O.A. Improving management system combined thruster propulsion systems. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU «KhPI»*, 2014, no.38(1081), pp. 45-51. (Ukr).
5. Budashko V.V., Onishchenko O.A. Mathematical principles of simulation of power plant's control system at drillship. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Kamchatka State Technical University*, 2014, no.29, pp. 6-13. (Rus).
6. Le Luo, Lan Gao, Hehe Fu. The control and modeling of diesel generator set in electric propulsion ship. *International Journal of Information Technology and Computer Science*, 2011, vol.3, no.2, pp. 31-37. Available at: <http://www.mecspress.org/ijitcs/ijitcs-v3-n2/IJITCS-V3-N2-5.pdf> (accessed 21 September 2015). doi: 10.5815/ijitcs.2011.02.05.
7. Budashko V.V., Onishchenko O.A., Yushkov E.A. Physical modeling of multi-propulsion complex. *Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoi akademii (m. Odesa) – Collection of scientific works of the Military Academy (Odessa City)*, 2014, no.2 pp. 88-92. (Rus).
8. Hansen J.F. *Modelling and control of marine power systems*. Doktor ingenior thesis, Trondheim, Norway, 2000. 119 p. Available at: [http://www.itk.ntnu.no/databaser/dr\\_ing\\_avhandling/vedlegg/110\\_pdf.pdf](http://www.itk.ntnu.no/databaser/dr_ing_avhandling/vedlegg/110_pdf.pdf) (accessed 21 September 2015).
9. Budashko V.V., Yushkov Y.A. Mathematic modeling of all-range controllers speed of thrusters for ship power plants in combined propulsion complexes. *Electronnoe modelirovanie – Electronic Modeling*, 2015, vol.37, no.2, pp. 101-114. (Rus).
10. WAMIT® / User manual // WAMIT, Inc.: Incorporated and Massachusetts Institute of Technology. – 2006. – 394 p. Available at: <http://www.engr.mun.ca/~bveitch/courses/8000/software/wamit/wamit.pdf> (accessed 21 September 2015).

Поступила (received) 23.09.2015

Будашко Виталий Витальевич, к.т.н., доц.,  
Одесская национальная морская академия,  
65029, Одесса, ул. Дидрихсона, 8,  
тел./phone +38 048 7332367, e-mail: bvv@te.net.ua

V.V. Budashko

Odessa National Maritime Academy,  
8, Didrikhson Str., Odessa, 65029.

### Implementation approaches during simulation of energy processes for a dynamically positioned ship.

**Purpose.** Creation of a mathematical model of the ship's power plant (SPP) combined propulsion complexes (CPC) that takes into account the behavior of all objects, including the ship itself, the transfer of power from the medium speed diesel generators on the propellers, which will allow to take into account the hydrodynamic properties of the vessel and their impact on the energy processes in SPP CPC. **Methodology.** The analysis of energy processes in the SPP CPC in different operating conditions resulted in creation of a strategy for constructing mathematical models of SPP CPC. This strategy is based on the implementation on the vector plane resulting power characteristics of SPP vectors disturbances, leading to the deviation of the hydrodynamic characteristics of the ship during operation dynamic positioning. The result allowed to consider not only the features of setting PID-governors of frequency converters of electric thrusters but the automatic voltage regulators of medium speed diesel generators as well. **Results.** Within the research work a software package Ships\_CPC in Matlab/Simulink was developed under the state budget project «Concepts, technologies and ways of improving ship power plants combined propulsion complexes» at the Department of Electromechanics and Electrical Engineering of Odessa National Maritime Academy. **Originality.** This complex represents a set of functional blocks of the components SPP CPC, built on the principle of «input-output». The simulation results demonstrate the ability to use software package Ships\_CPC to study the effect of various settings on the energy regulators of processes SPP CPC, which can develop and integrate the different strategies of automatic voltage regulators. **Practical value.** Since software complex Ships\_CPC was developed under Open system technology, it can reorganize, re-tune and integrate in processes of any difficulties with further completion in the form of a universal structure. References 10, figures 7.

**Key words:** ship power plants, combined propulsion complex, dynamic positioning, mathematical modeling, transfer of power, efficiency, regulation.