

РАСЧЁТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЕДИНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СУДОВ С ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЕМ

Васин И.М.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», (СПбГЭТУ), E-mail: vkv-piter@yandex.ru.

Одним из перспективных направлений развития современного судостроения является концепция создания «полностью электрического корабля» (Full Electric Ship, FES). В свою очередь реализация этой концепции невозможна без создания современного энергетического ядра FES – единой электроэнергетической системы (ЕЭЭС), включающей в себя, в том числе и системы электродвижения (СЭД). Необходимыми этапами проектирования и безопасной эксплуатации структурно сложных систем FES-уровня являются системные расчёты и математическое моделирование, на основе результатов которых выполняется полномасштабное проектирование и создаются опытно-поставочные образцы. При этом к выбору и разработке алгоритмов управления гребными электроприводами (ГЭП) предъявляются особые требования. В частности, система автоматического управления синхронного ГЭП судна ледового класса должна обеспечивать режимы поддержания постоянства частоты вращения, постоянства мощности и постоянства электромагнитного момента гребного электродвигателя (ГЭД). В статье приводятся математическое описание и результаты компьютерного моделирования режимов работы судовых машинно-вентильных комплексов ЕЭЭС в составе главных генераторных агрегатов, силовых полупроводниковых преобразователей, гребных электродвигателей и винто-рулевых комплексов.

Ключевые слова: единые электроэнергетические системы, судовое электрооборудование, компьютерное моделирование и математические расчёты.

CALCULATION AND MATHEMATICAL MODELING OF OPERATING MODES OF INTEGRATED ELECTRICAL POWER SYSTEMS OF VESSELS WITH ELECTRIC PROPULSION

Vasin I.M.

Federal public budgetary educational institution of higher education «The St. Petersburg state electrical engineering university "LETI" of V. I. Ulyanov (Lenin)», E-mail: vkv-piter@yandex.ru

One of the perspective directions of development of modern shipbuilding is the creation concept of «full electric ship» (FES). In turn implementation of this concept is impossible without creation of a modern power kernel of FES – the integrated electrical power system (IEPS), including electric propulsion systems (EPS). Necessary stages of design and safe operation of structurally difficult systems of FES-level are system calculations and mathematical modeling on the basis of which results full-scale design is carried out and skilled and deliverable samples are created. Special requirements are imposed to a choice and development of management algorithms by rowing electric drives (RED). In particular, the system of automatic control synchronous RED of ice class vessels must to provide constancy of the frequency rotation modes, constancy of power and constancy of the electromagnetic moment of synchronous rowing electric motors (REM). The mathematical description and results of computer modeling of operating modes of the IEPS ship machine and valve complexes consists of the main generating units, power semiconductor converters, REM and propeller steering complexes are provided in article.

Keywords: integrated electrical power systems, ship electric equipment, computer modeling and mathematical calculations.

В настоящее время, благодаря появлению новых технологий, появилась возможность значительно продвинуться в одном из перспективных направлений развития современного кораблестроения – в направлении создания «полностью электрического корабля» [4].

Силовая электроника дала возможность использовать полупроводниковые преобразователи частоты (ППЧ) большой мощности для создания мощных преобразовательных комплексов и расширения диапазона применения гребного электропривода (ГЭП). Совершенствование же технологий создания винто-рулевых колонок (ВРК) позволяет отказаться от рулей и носовых подруливающих устройств, обеспечивая отличные динамические качества и манёвренность судна.

Объединение электротехнических и энергетических комплексов в единую электроэнергетическую систему (ЕЭЭС), решающую задачи как обеспечения потребителей собственных нужд, так и движения судна в целом, резко усложнили чисто электротехнические вопросы, решаемые ранее автономно. Использование на судах мощных потребителей привело к резкому увеличению установленной мощности электростанций, что, в свою очередь, потребовало увеличения напряжения на шинах главных распределительных щитов. Резко изменились параметры генераторных агрегатов судовых электростанций (СЭС). Потребовались исследования возможности применения в составе СЭС ранее неизвестных перспективных генераторных агрегатов. Последствия аварийных режимов стали более угрожающими, что потребовало дополнительных исследований не только штатных, но и аварийных режимов работы генераторных агрегатов судовых электростанций [2].

Известно, что длительность безаварийной работы любого технического оборудования и судового электрооборудования, в частности, зависит от качества его проектирования, изготовления и условий эксплуатации. При этом недостатки, допущенные на этапах проектирования, в значительной мере отражаются на всех последующих этапах. Поэтому абсолютно необходимо уже на стадии проектирования предусматривать возможности аварий, уметь дать оценку характеру протекания аварийных процессов и определить пути вывода системы из аварийного состояния с минимальным ущербом для неё и обслуживающего её персонала.

ЕЭЭС судов с электродвижением являются сложнейшими машинно-вентильными комплексами, включающими в себя главные синхронные турбо- и дизель-генераторы, гребные электродвигатели (ГЭД) с мощными силовыми ППЧ, ВРК и системы приёма и распределения электроэнергии (рис.1). Совокупность последних определяет архитектуру СЭС, отличающихся большим разнообразием элементов, а, следовательно, и процессов, происходящих в установившихся и переходных режимах их работы.

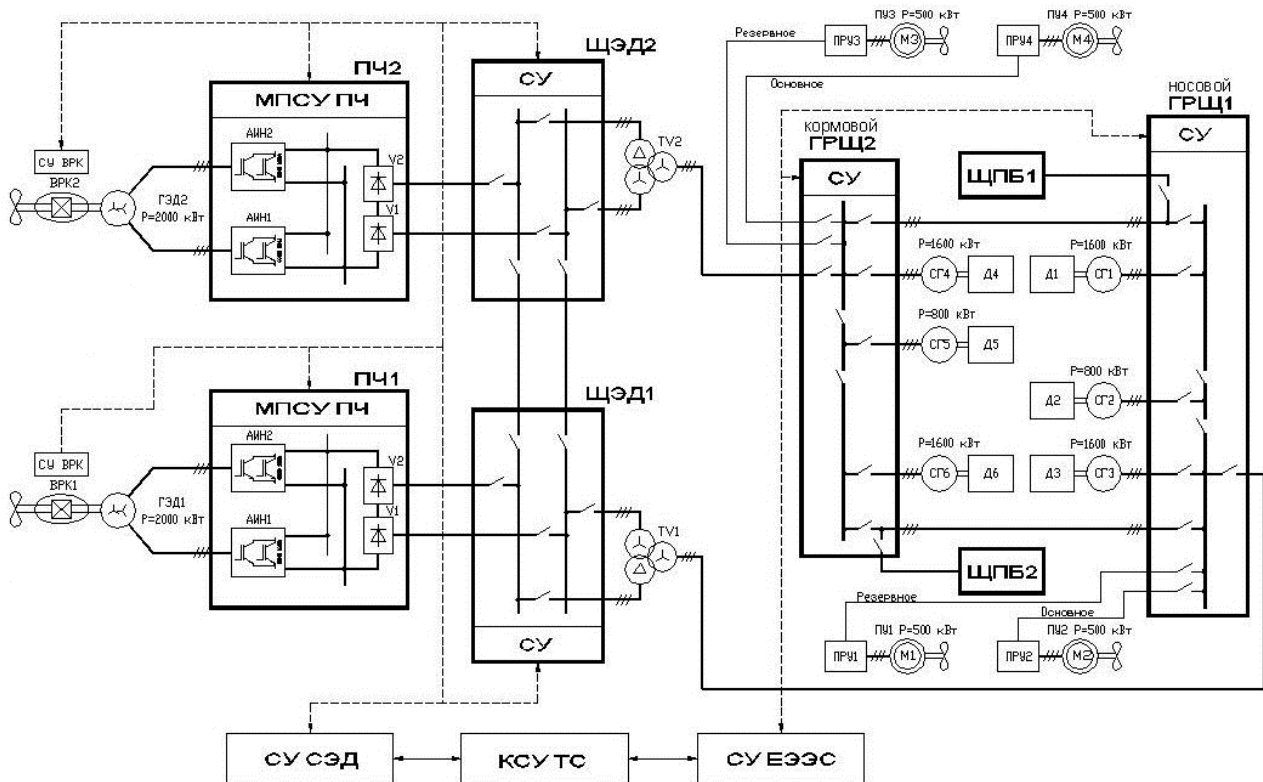


Рисунок 1. Структура ЕЭЭС грузового судна с электродвижением

Функциональные связи, существующие между элементами ЕЭЭС, описываются системами нелинейных алгебраических и дифференциальных уравнений высокого порядка. Это характеризует ЕЭЭС как сложную динамическую систему. Поэтому при проектировании судовых ЕЭЭС необходимо одинаково тщательно рассматривать процессы как в электрических машинах, так и в ППЧ.

Теория электрических цепей и электрических машин переменного тока позволяет записать уравнения основных функциональных элементов СЭС безотносительно к выбираемым координатным осям и системам координат. Эти уравнения учитывают баланс напряжений статорных и роторных контуров, выражения статорных и роторных потокосцеплений, баланс моментов электрических машин и баланс токов в узлах цепей.

Систему уравнений, используемую для моделирования динамических режимов работы СЭС, можно записать в виде [1]:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ -Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
\begin{vmatrix} [I_{CT1}] \\ [I_{CT2}] \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} -[Y_{r1}] & 0 \\ 0 & -[Y_{r2}] \end{vmatrix} \begin{vmatrix} [U_1] \\ [U_2] \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} [Q_1] \\ [Q_2] \end{vmatrix}, \\
\begin{vmatrix} [I_{p1}] \\ [I_{p2}] \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} [MK_{41}] & 0 \\ 0 & [MK_{42}] \end{vmatrix} \begin{vmatrix} [\Psi_{p1}] \\ [\Psi_{p2}] \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} [MK_{51}] & 0 \\ 0 & [MK_{52}] \end{vmatrix} \begin{vmatrix} [I_{CT1}] \\ [I_{CT2}] \end{vmatrix}, \\
[Y_{11}] &= [Y_{r1}] + [Y_{c\theta 1}] + [Y_{H1}] + [Y_{\delta\theta}], \\
[Y_{12}] &= [Y_{c\theta 1}] + [CK_{12}], \\
[Y_{21}] &= [Y_{c\theta 2}] + [OCK_{12}], \\
[Y_{22}] &= [Y_{r2}] + [Y_{c\theta 2}] + [Y_{H2}], \\
[Q_i] &= [Y_{ri}][G_{ri}][\Psi_{pi}], \\
\begin{vmatrix} [I_{CB1}] \\ [I_{CB2}] \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} [Y_{CB1}]([U_1] - [CK_{12}][U_2]) \\ [Y_{CB2}]([U_2] - [OCK_{12}][U_1]) \end{vmatrix}, \\
F_{pi} &= I_{fi} - K_i I_{di} + I_{Di}, \quad \Psi_{fi} = f_i(F_{pi}), \\
[\Psi_{CT}] &= [R][I_{CT}] + [P][I_P], \\
M &= \Psi_d I_q + \Psi_q I_d, \quad P = U_d I_d + U_q I_q, \\
Q &= U_q I_d - U_d I_q, \quad U_f = U_q + x_d I_d - I_y, \\
U_f &= K_u U + K_I I + I_D - K_P I_f, \quad K_P = f(I), \\
U &= \sqrt{U_d^2 + U_q^2}, \quad I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}, \\
\begin{vmatrix} [p\Psi_{p1}] \\ [p\Psi_{p2}] \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} [MK_{11}] & 0 \\ 0 & [MK_{12}] \end{vmatrix} \begin{vmatrix} [\Psi_{p1}] \\ [\Psi_{p2}] \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} [MK_{31}] & 0 \\ 0 & [MK_{32}] \end{vmatrix} \begin{vmatrix} U_{f1} \\ U_{f2} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} [MK_{21}] & 0 \\ 0 & [MK_{22}] \end{vmatrix} \begin{vmatrix} [I_{CT1}] \\ [I_{CT2}] \end{vmatrix}, \\
\begin{vmatrix} pI_{y1} \\ pI_{y2} \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} -1/T_{k1} & 0 \\ 0 & -1/T_{k2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{y1} \\ I_{y2} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} K_1/T_{k1} & 0 \\ 0 & K_2/T_{k1} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} U_1 \\ U_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} -K_1/T_{k1} & 0 \\ 0 & -K_2/T_{k2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} U_{H1} \\ U_{H2} \end{vmatrix}, \\
\begin{vmatrix} p\phi_1 \\ p\phi_2 \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} 1/T_{a1} & 0 \\ 0 & 1/T_{a2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \mu_{p1} \\ \mu_{p2} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} -1/T_{a1} & 0 \\ 0 & -1/T_{a2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} M_{\theta 1} \\ M_{\theta 2} \end{vmatrix}, \\
\begin{vmatrix} p\mu_{p1} \\ p\mu_{p2} \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} -1/T_{s1} & 0 \\ 0 & -1/T_{s2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \mu_{p1} \\ \mu_{p2} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} -K_{s1}/T_{s1} & 0 \\ 0 & -K_{s2}/T_{s2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} K_{s1}/T_{s1} & 0 \\ 0 & K_{s2}/T_{s2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \mu_{o1} \\ \mu_{o2} \end{vmatrix}, \\
[p\delta_{12}] &= K_{12}(\phi_1 - \phi_2).
\end{aligned}$$

куда входят матрицы параметров и векторы переменных состояний генераторов, первичных двигателей, регуляторов напряжения и частоты вращения, параметры нагрузки и линии связи.

Результаты моделирования динамических режимов параллельной работы генераторов СЭС ЕЭС представлены на рис.2.

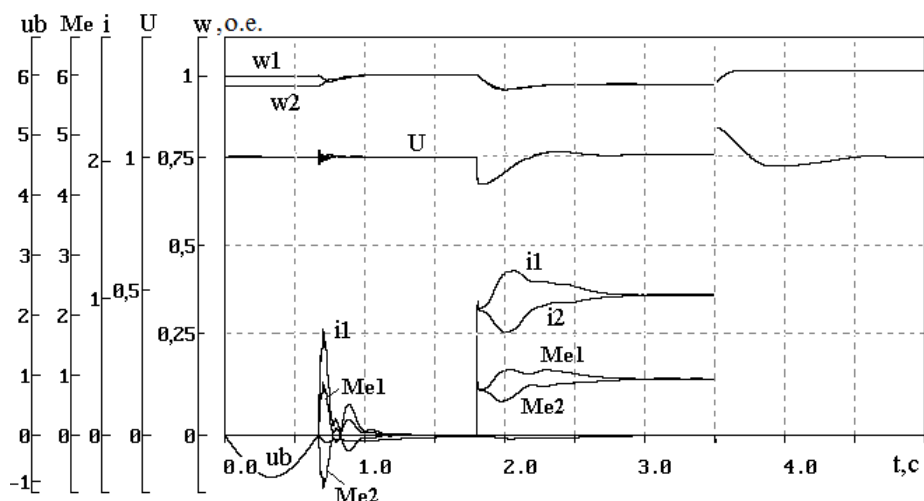


Рисунок 2. Пример расчёта динамических режимов параллельно работающих СГА СЭС

Разработка многоагрегатных СЭС, транзисторных и тиристорных ГЭП связана с анализом новых схем и большим объемом расчётов как при выборе структуры и элементов силовой части, так и при выборе состава и алгоритмов системы управления. В настоящее время разработано много сред моделирования, позволяющих осуществить анализ электромагнитных и электромеханических процессов в силовых электронных схемах и электромеханических устройствах (MatLab, DisignLab, MathCAD, MicroCAP, CASPOC и др.).

Для высококачественного управления асинхронным ГЭП в широком диапазоне регулирования скорости, в том числе в области нулевых скоростей, необходимо иметь возможность быстрого, непосредственного управления моментом ГЭД. Для получения требуемого момента необходимо вычислять координаты ГЭД, недоступные прямому измерению, и управлять амплитудой и фазой вектора напряжения, так чтобы поддерживать на заданном уровне потокосцепление и момент.

Реализация алгоритмов векторного управления с использованием математических моделей асинхронного ГЭД базируется на информации о фазных токах, протекающих в обмотках статора электродвигателя и скорости вращения ротора. Эта же информация используется в ГЭП в качестве сигналов обратной связи.

Математическая модель в алгоритмах векторного управления используется для вычисления некоторых ненаблюдаемых параметров ГЭД, которые затем принимают участие в процессе управления [5].

Вычисление параметров ненаблюдаемых координат асинхронного ГЭД производится в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned}
\Psi_{1\alpha} &= \int (U_{1\alpha} - i_{1\alpha} R_1) dt; \\
\Psi_{1\beta} &= \int (U_{1\beta} - i_{1\beta} R_1) dt; \\
\Psi_{2\alpha} &= i_{1\alpha} (L_{12} - \frac{L_1 L_2}{L_{12}}) + \frac{\Psi_{1\alpha} L_2}{L_{12}}; \\
\Psi_{2\beta} &= i_{1\beta} (L_{12} - \frac{L_1 L_2}{L_{12}}) + \frac{\Psi_{1\beta} L_2}{L_{12}}; \\
\Psi_{2M} &= \sqrt{\Psi_{2\alpha}^2 + \Psi_{2\beta}^2}; \\
\text{Cos}\gamma &= \frac{\Psi_{2\alpha}}{\Psi_{2M}}; \\
\text{Sin}\gamma &= \frac{\Psi_{2\beta}}{\Psi_{2M}}; \\
i_{1U} &= i_{1\alpha} \text{Cos}\gamma + i_{1\beta} \text{Sin}\gamma; \\
i_{1V} &= i_{1\beta} \text{Cos}\gamma - i_{1\alpha} \text{Sin}\gamma; \\
i_{1V3} &= \frac{2M_{\text{ЭЗ}} L_2}{3P_{\text{II}} L_{12} \Psi_{2M}}
\end{aligned}
\tag{2}$$

куда входят параметры и векторы переменных состояния математической модели ГЭД [3].

Схема частотно-регулируемого ГЭП для векторного управления ГЭД, входящего в состав СЭД грузового судна с электродвижением, представлена на рис. 3:

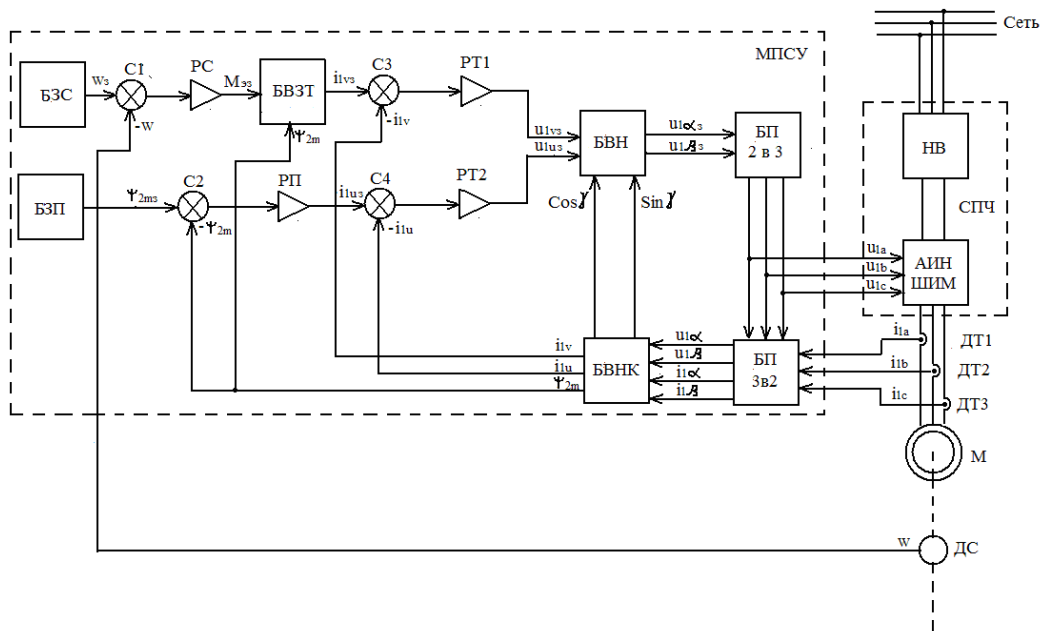


Рисунок 3. Структура математической модели ГЭП грузового судна с электродвижением

Результаты математического моделирования установившегося режима работы ГЭП и динамических режимов работы СЭД при пуске, реверсе и остановки ГЭД представлены на рис. 4 и рис. 5.

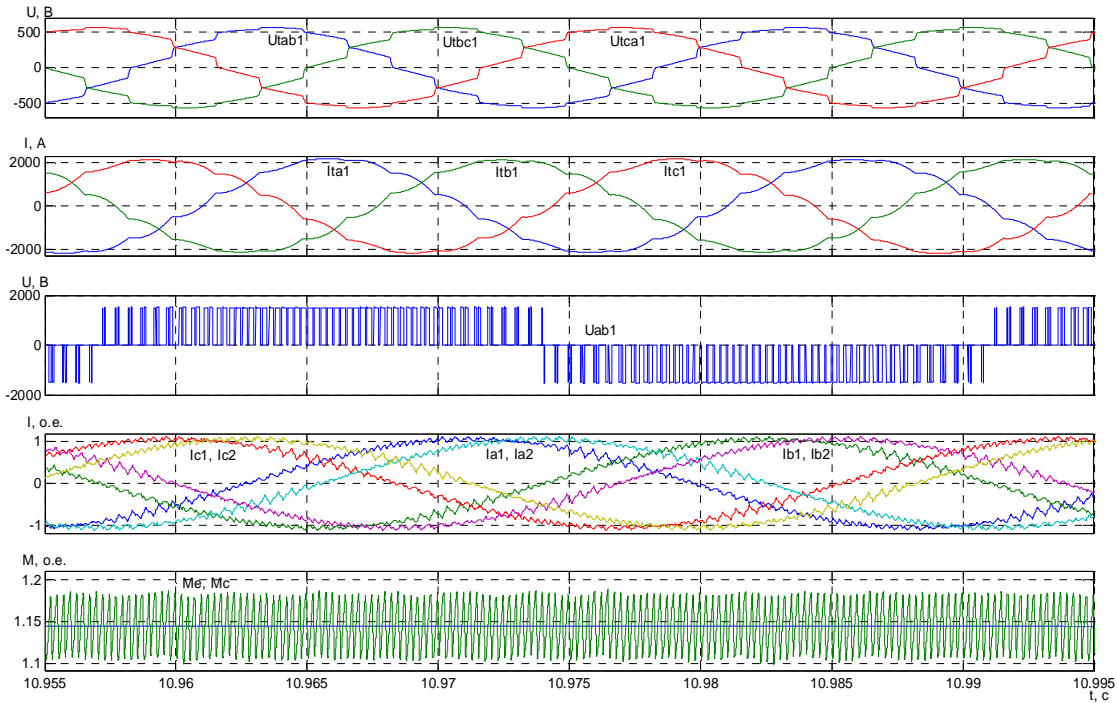


Рисунок 4. Результаты математического моделирования установившегося режима работы ГЭП

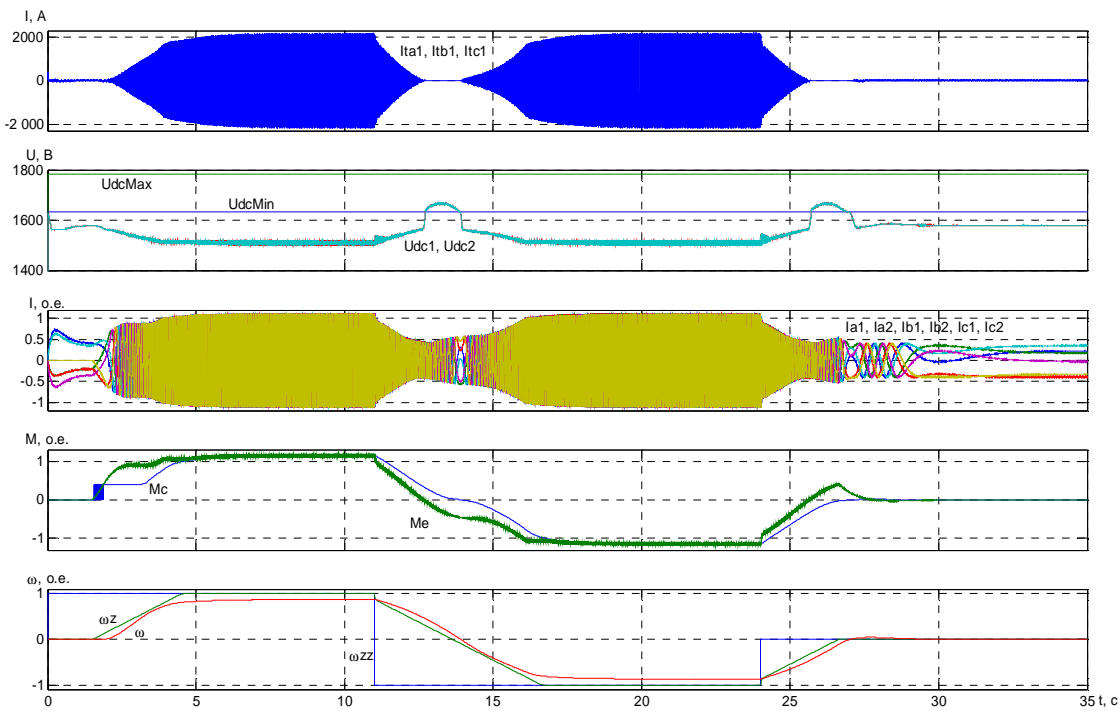


Рисунок 5. Результаты математического моделирования режимов работы СЭД при пуске, реверсе и остановке ГЭД

Выводы

Представленное в работе математическое описание СЭС и СЭД позволяет исследовать штатные и аварийные режимы работы различных вариантов судовых ЕЭЭС.

При интегрировании математического аппарата исследования режимов работы ЕЭЭС в систему уравнений, описывающих динамику движения судна в целом, удаётся получить инструмент для оценки динамических режимов работы судна. Созданные варианты поставочных комплексов ЕЭЭС в настоящее время вводятся в эксплуатацию и проходят апробацию на целом ряде отечественных судов с электродвижением.

Список литературы

1. Васин И.М., Токарев Л. Н. Физические процессы в электрических машинах и системах. Математическое описание и расчет. – СПб.: Литера, 2008. – 216 с.
2. Васин И.М., Григорьев А.В., Хомяк В.А. Комплексный подход при создании судовых электроэнергетических систем и установок. – СПб.: Судостроение, 2008. – № 2.
3. Козярук А.Е., Плахтына Е.Г. Вентильные преобразователи в судовых электромеханических системах. – Л.: Судостроение, 1987. – С.192.
4. All-electric ships exert a powerful attraction // Warship technology. May 2003. P. 6–8.
5. C. French and P. Acarnley. Direct torque control of permanent magnet drive. In IEEE Ind. Applicat. Society Annu. Meet., 1995. P. 199-206.

Рецензенты:

Коновалов А.С., д.т.н., профессор кафедры «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (ГУАП), г. Санкт-Петербург.

Цицикян Г.Н., д.т.н., профессор, начальник отдела филиала «ЦНИИ СЭТ» Крыловского государственного научного центра, г. Санкт-Петербург.