

В.И. Вершинин, С.В. Махонин, В.А. Паршиков, В.А. Хомяк
Филиал «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРЕБНЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ УНИВЕРСАЛЬНЫХ АТОМНЫХ ЛЕДОКОЛОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Объект и цель научной работы. Объектом работы является автоматизированный частотно-регулируемый гребной электропривод, входящий в состав системы электродвижения универсального атомного ледокола, в настоящее время находящегося в стадии строительства. Цель работы заключается в разработке функциональной схемы системы управления электроприводом, в основу которой положен алгоритм векторного управления, позволяющий практически реализовать совокупность жестких требований к динамическим свойствам гребного электропривода.

Материалы и методы. Исходными материалами являются научно-техническая информация, представленная в трудах, посвященных теории электропривода, а также личные наработки и многолетний опыт, накопленные авторами в ходе проведения НИР и ОКР по разработке судовых систем электродвижения. Решение поставленной задачи базируется на методах построения частотно-регулируемого гребного электропривода как замкнутой системы автоматического регулирования, содержащей несколько каналов управления, каждый из которых, в свою очередь, содержит несколько контуров, синтезированных на принципах последовательной коррекции.

Основные результаты. Разработана система управления гребным частотно-регулируемым электроприводом на основе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором мощностью 20 МВт, который по быстродействию и поддержанию точности задаваемых выходных координат не уступает лучшим электроприводам отечественного и зарубежного производства.

Заключение. Ценность полученных практических результатов заключается в создании системы управления гребным электроприводом в виде совокупности блоков, производящих математические операции как с контролируемыми параметрами, так и с ненаблюдаемыми физическими координатами. Данная система принята за основу в ходе разработки программного продукта, закладываемого в микропроцессорную систему управления гребной электрической установки строящегося универсального атомного ледокола проекта 22220.

Ключевые слова: система электродвижения, гребной электропривод, система управления электроприводом, асинхронный двигатель, векторное управление, преобразователь частоты, электромагнитный момент, гребной винт, частота вращения, компьютерная модель, пакет прикладных программ Simulink MATLAB.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Вершинин В.И., Махонин С.В., Паршиков В.А., Хомяк В.А. Особенности построения системы управления гребными электроприводами универсальных атомных ледоколов нового поколения. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 2(384): 61–69.

УДК 629.561.5:62-83

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-61-69

V. Vershinin, S. Makhonin, V. Parshikov, V. Khomyak
TSNII SET Branch of Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

DESIGN SPECIFICS OF CONTROL SYSTEM FOR ELECTRIC PROPULSION DRIVE ABOARD MULTI-PURPOSE NUCLEAR ICEBREAKERS OF THE NEW GENERATION

Object and purpose of research. This paper studies automated frequency-controlled electric propulsion drive being an element of electric propulsion system aboard a multi-purpose nuclear icebreaker currently under construction. The purpose of this work is to develop a flow chart of electric drive control system based on vector control algorithm that meets a number of tough requirements to dynamic properties of electric propulsion drive.

Materials and methods. Input data for this work were scientific and technical data given in the literature on electric drive theory, as well as personal findings and multi-year experience of the authors in the R&D activities related to electric propulsion of ships. Solution to this problem is based on designing a frequency-controlled electric propulsion drive as a closed-loop automatic regulation system with several control channels, each of these, in its turn, consisting of several circuits synthesized as per cascade compensation principles.

Main results. The result of this work is a control system for frequency-regulated electric propulsion drive based on 20 MW squirrel-cage rotor that equals the best Russian and foreign electric drives in terms of response speed and accuracy of maintaining specified output coordinates.

Conclusion. The value of the practical results obtained by the authors is development of the control system for electric propulsion drive as a totality of units performing mathematical operations with both controllable parameters and non-observable physical coordinates. This system is the basis for development of the software to be used in the microchip-based control system of electric propulsion plant for Project 22220 multi-purpose nuclear icebreaker currently under construction.

Key words: electric propulsion system, electric propulsion drive, control system, asynchronous motor, vector control, frequency converter, electromagnetic torque, propeller, RPM, computer-based model, Simulink MATLAB application package.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Verшинin V., Makhonin S., Parshikov V., Khomyak V. Design specifics of control system for electric propulsion drive aboard multi-purpose nuclear icebreakers of the new generation. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 2(384): 61–69 (in Russian).

УДК 629.561.5:62-83

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-61-69

Одной из основных задач при промышленном освоении и добыче углеводородов арктического шельфа РФ, а также создании транспортных путей по их доставке на энергетические рынки Западной Европы и Азиатского региона является формирование мощного ледокольного флота. Сегодня решению этой задачи в отечественной судостроительной отрасли придается первостепенное значение. В частности, в ООО «Балтийский завод – Судостроение» осуществляется строительство серии универсальных атомных ледоколов проекта 22220, суммарная пропульсивная мощность гребных винтов которых составляет 60 МВт, а в конструктор-

ских бюро и научно-исследовательских институтах ведутся работы по техническому проектированию атомного ледокола проекта «Лидер», у которого пропульсивная мощность на гребных валах составит 120 МВт.

Одной из отличительных особенностей систем электродвижения (СЭД) ледоколов указанных проектов является использование в качестве гребных электродвигателей (ГЭД) электромашинных агрегатов (ЭМА), представляющих собой две асинхронные электрические машины (АЭМ) с короткозамкнутым ротором. Обе АЭМ располагаются в одном конструктиве, их роторы имеют общий вал, нагруженный на гребной винт (ГВ). На статоре каждой АЭМ располагаются несколько трехфазных обмоток (две у ГЭД ледокола проекта 22220 и три у ГЭД ледокола проекта «Лидер»). Обе пары или тройки трехфазных обмоток, уложенных на статоре АЭМ, получают питание от отдельного статического преобразователя частоты (ПЧ), т.е. в состав одного гребного электропривода (ЭП) кроме ЭМА входят два ПЧ. Каждый ПЧ, в свою очередь, получает питание от нескольких (двух на ледоколе проекта 22220 и трех на ледоколе проекта «Лидер») трехобмоточных трансформаторов (Т), вторичные обмотки которых соединены одна в «звезду», а вторая – в «треугольник». СЭД ледокола проекта 22220 содержит три гребных ЭП, а ледокола проекта «Лидер» – четыре. Упрощенная схема силовой части гребного ЭП ледокола проекта 22220 приведена на рис. 1 (подробное описание см. в [1]).

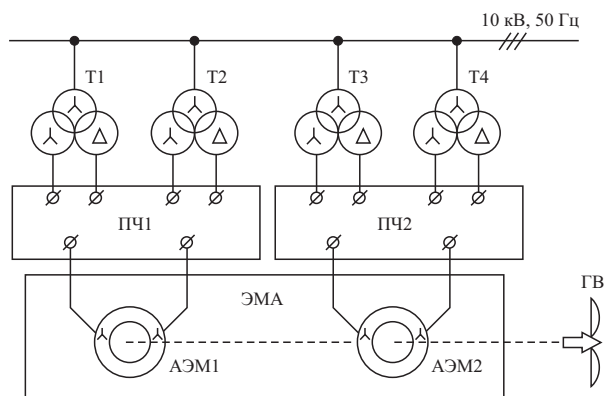


Рис. 1. Упрощенная схема силовой части гребного ЭП

Fig. 1. Simplified layout of the electric drive's power part

Функционально гребной ЭП представляет собой частотно-регулируемый электропривод с алгоритмом векторного управления. Суть этого алгоритма заключается в том, что система управления электроприводом (СУЭП) оперирует не реальными трехфазными переменными напряжениями и токами, а их виртуальными аналогами, вычисляемыми в двухфазной системе координат U , V , которая вращается с синхронной скоростью, и ось V которой направлена по вектору потокоцепления ротора. Напряжения и токи ЭМА, вычисляемые в такой системе координат, являются постоянными по знаку. Последнее обстоятельство позволяет синтезировать СУЭП частотно-регулируемого ЭП переменного тока, используя принципы построения, применяемые в многоконтурных ЭП постоянного тока с последовательной коррекцией выходных параметров. ЭП подобного типа на сегодняшний день обладают наилучшими динамическими свойствами в части реализации заданного закона изменения выходных параметров и поддержания их постоянства на заданном уровне при воздействии внешних возмущающих факторов.

Системы управления гребными ЭП ледоколов вышеуказанных проектов в зависимости от положения рукоятки управления в командоаппарате реализуют два режима работы:

- режим регулирования частоты вращения ГВ (рукоятка управления находится в первых 10 положениях);
- режим регулирования мощности на ГВ (рукоятка управления находится в следующих 10 положениях).

Диаграммы изменения частоты вращения и мощности ГВ в зависимости от положения рукоятки управления, реализуемые в этих режимах СУЭП ледокола проекта 22220, приведены на рис. 2.

Другой, уже эксплуатационной особенностью СЭД ледоколов рассматриваемых проектов, являются величины параметров гребных ЭП, характеризующие режимы «фрезерования льда» и «заклинивания ГВ» (стоянки под током). «Фрезерование льда» ГВ производится при частотах вращения до 50 об/мин. При работе ЭП в этом режиме статический момент нагрузки на ГВ превышает номинальное значение приблизительно в 1,6 раза. В режиме «заклинивания» ГВ электромагнитный момент, развиваемый ЭМА, должен быть ограничен СУЭП на уровне 1,8 от номинального значения. Максимальная длительность режима «фрезерования льда» – 30 с, а режима «заклинивания» – 10 с. Общее количество режимов «фрезерования льда» и «заклини-



Рис. 2. Диаграммы изменения частоты вращения и мощности ГВ в зависимости от положения рукоятки управления

Fig. 2. Variation of propeller RPM and power depending on control handle position

вания» не должно превышать 15 раз в течение одного часа.

Наличие перечисленных выше особенностей гребных ЭП предопределяет необходимость некоторой корректировки алгоритма векторного управления, используемого при синтезе их СУЭП. В частотно-регулируемых ЭП с алгоритмом векторного управления [2, 3] канал управления частотой вращения традиционно содержит два контура: внешний (скоростной) и внутренний (токовый). Внутренний контур подчинен внешнему, поскольку сигнал задания для него формирует пропорционально-интегральный регулятор электромагнитного момента внешнего контура. Если принять такую схему построения СУЭП без изменения, то при работе гребного ЭП в режиме регулирования частоты вращения обе АЭМ, образующие ЭМА, будут развивать одинаковые электромагнитные моменты, т.к. сигнал задания момента для них является общим. Однако токи, протекающие по обмоткам этих АЭМ, будут различаться по величине. Это явление объясняется технологическим разбросом параметров АЭМ (главным образом неидентичностью взаимных индуктивностей фаз статора и ротора, определяемой различием величины воздушного зазора).

На рис. 3 показаны диаграммы изменения частоты вращения ГВ, суммарного электромагнитного момента, развиваемого ЭМА, и электромагнитных моментов, развиваемых каждой АЭМ по отдельности в процессе пуска и разгона частоты вращения до 5,23 1/с (50 об/мин) с последующим переходом в режим «фрезерования льда» и режим заклинивания. Диаграммы получены в результате

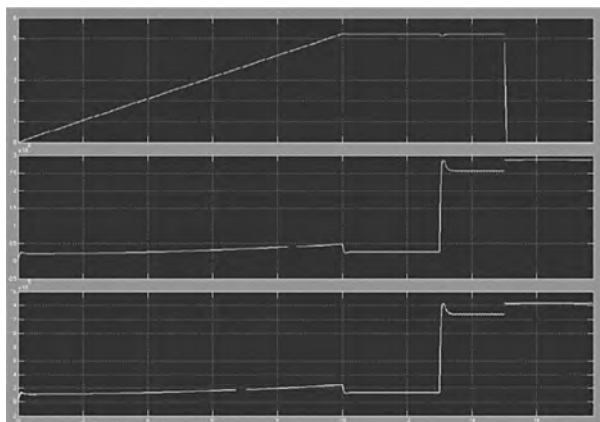


Рис. 3. Диаграммы изменения (сверху вниз) частоты вращения и суммарного электромагнитного момента ЭМА, а также электромагнитных моментов каждой из двух АЭМ. Режим пуска и разгона до частоты вращения 5,23 1/с с последующим переходом в режимы «фрезерования льда» и стоянки под током

Fig. 3. Variation diagrams (from top to bottom) of total RPM and electromagnetic torque of asynchronous motor assembly, as well as electromagnetic moments for each of its two asynchronous motors. Conditions: launching and acceleration up to the speed of 5.23 1/s with subsequent transition to ice milling and standby under current

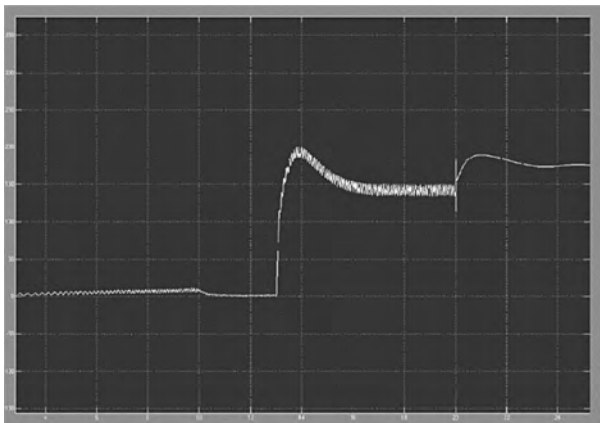


Рис. 4. Диаграмма изменения разности действующих значений токов, потребляемых одноименными фазами обмоток статоров двух АЭМ, образующих ЭМА. Режим пуска и разгона до частоты вращения 5,23 1/с с последующим переходом в режимы «фрезерования льда» и стоянки под током

Fig. 4. Variation diagrams for the difference of actual currents consumed by the same phases of stator coils, for the two asynchronous motors making up the assembly. Conditions: launching and acceleration up to the speed of 5.23 1/s with subsequent transition to ice milling and standby under current

компьютерного моделирования электромеханических процессов, протекающих в гребном ЭП СЭД ледокола проекта 22220. В качестве компьютерной модели ЭП использовалась модель, схема и описание которой приведены в [4]. В процессе моделирования параметры обеих АЭМ брались одинаковыми, за исключением взаимной индуктивности фаз статора и ротора, которые различались на 4 %, что является весьма характерным для продукции отечественного и зарубежного энергомашиностроения. На рис. 4 представлена диаграмма, характеризующая различие токов, протекающих в одноименных фазах статорных обмоток АЭМ, снятая в этих же режимах. Анализ диаграмм, представленных на рис. 3, 4, свидетельствует о том, что в исследуемых режимах работы гребного ЭП обе АЭМ развивали одинаковый электромагнитный момент, однако токи, потребляемые машинами от ПЧ, были различными по величине, особенно в режимах «фрезерования льда» и «заклинивания». В этих режимах действующие значения одноименных фазных токов обмоток статора у АЭМ различались на 150 А (режим «фрезерования льда») и на 190 А (режим «заклинивания»). Если для электрических машин в кратковременном режиме работы такое различие допустимо, то для ПЧ, от которых они получают питание, оно критично. При работе гребного ЭП в режимах «фрезерования льда» и «заклинивания» ток на выходе ПЧ превышает номинальное значение приблизительно в два раза и поэтому дополнительная перегрузка по току одного из них, обусловленная технологическим разбросом параметров АЭМ, может привести к выходу из строя полупроводниковых ключей ПЧ и созданию аварийной ситуации.

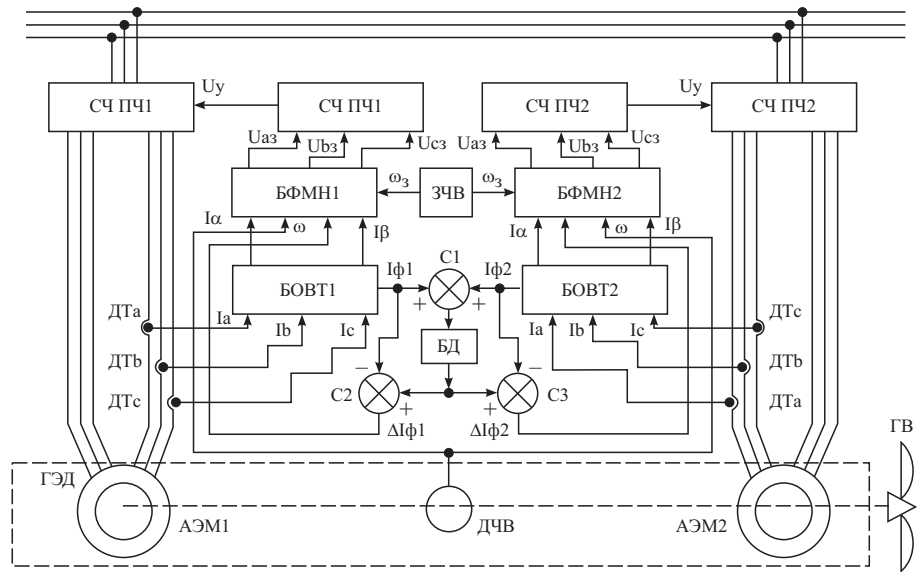
На рис. 5 приведена функциональная схема канала регулирования частоты вращения ЭП, предлагаемая авторами настоящей статьи и позволяющая свести к минимуму негативные последствия описанного выше явления. На схеме представлены:

- а) силовые части двух ПЧ (СЧ ПЧ1 и СЧ ПЧ2);
- б) системы управления работой силовых частей ПЧ (СУ ПЧ1 и СУ ПЧ2);
- в) задатчик частоты вращения (ЗЧВ);
- г) датчик частоты вращения (ДЧВ);
- д) ГЭД – ЭМА, который содержит две электрические машины АЭМ1 и АЭМ2, нагруженные на ГВ.

Кроме того, на функциональной схеме показана СУ ЭП, которая на практике реализуется в виде программного продукта, закладываемого в командный контроллер микропроцессорной системы

Рис. 5. Функциональная схема канала регулирования частоты вращения ГЭД

Fig. 5. Functional layout of propulsion motor speed regulation channel



управления ЭП. Здесь же, в целях понимания реализуемых ею процессов, она представлена аппаратными средствами в виде следующих блоков:

- блоки определения величин токов, потребляемых обмотками, уложенными на статорах АЭМ1 и АЭМ2 (БОВТ1, БОВТ2);
- блоки формирования модуляционного напряжения ПЧ (БФМН1, БФМН2);
- сумматоры С1-С3;
- блок деления БД.

Блоки БОВТ1 и БОВТ2 предназначены для:

- вычисления проекций обобщенных векторов токов (которые потребляются трехфазными обмотками, уложенными на статорах АЭМ1 и АЭМ2) на осях α , β двухфазной системы координат, неподвижной относительно статоров ГЭД;
- вычисления величин действующих значений фазных токов, потребляемых обмотками, уложенными на статорах АЭМ1 и АЭМ2.

Входными параметрами для этих блоков являются фазные токи, величины мгновенных значений I_a , I_b , I_c которых измеряются соответствующими датчиками токов ДТа, ДТб и ДТс. Вычисления проекций обобщенных векторов фазных токов на оси двухфазной системы координат производятся с помощью математических выражений [5]

$$\begin{aligned} I_\alpha &= I_A; \\ I_\beta &= \frac{1}{\sqrt{3}}(I_b - I_c). \end{aligned} \quad (1)$$

В свою очередь, для вычисления действующих значений фазных токов $I_{\phi 1}$, $I_{\phi 2}$, которые потребляются обмотками, уложенными на статорах АЭМ1 и АЭМ2, используется выражение [5]

$$I_\phi = 0,7\sqrt{I_\alpha^2 + I_\beta^2}, \quad (2)$$

где $\sqrt{I_\alpha^2 + I_\beta^2}$ – амплитудное значение фазного тока.

Вычисленные величины действующих значений фазных токов $I_{\phi 1}$, $I_{\phi 2}$ складываются с помощью сумматора С1, а затем полученная сумма посредством блока БД делится пополам, в результате чего вычисляется среднеарифметическое действующее значение фазных токов, потребляемых одноименными обмотками, уложенными на статорах АЭМ1 и АЭМ2. Вычисленная величина среднеарифметического действующего значения поступает на положительные порты сумматоров С2, С3, а вычисленные действующие значения фазных токов $I_{\phi 1}$ (сумматор С2), $I_{\phi 2}$ (сумматор С3) – на отрицательные порты. Разности между среднеарифметическим действующим значением и фактическими действующими значениями $\Delta I_{\phi 1}$ и $\Delta I_{\phi 2}$ с выходных портов сумматоров С2, С3 поступают в блоки БФМН1 и БФМН2, в которых они используются в качестве корректирующих сигналов, о чем подробнее будет сказано ниже.

Блоки БФМН1 и БФМН2 выполняют основную функцию СУ ЭП – формирование требуемых параметров выходного напряжения ПЧ, обеспечивающих выполнение задаваемого закона управления ГЭД.

матора С2 приведет к уменьшению сигнала задания электромагнитного момента M_3 , развиваемого АЭМ, что вызовет уменьшение задания тока, потребляемого обмотками статора одной АЭМ. Соответственно, наличие отрицательного сигнала на отрицательном порту сумматора С2 приведет к увеличению сигнала задания электромагнитного момента. Иными словами, вышеуказанная корректировка сигналов задания электромагнитных моментов обеспечит равенство токов, потребляемых обеими АЭМ от ПЧ во всех режимах работы гребного ЭП.

Этот вывод подтверждается результатами компьютерного моделирования электромеханических процессов, протекающих в гребном ЭП в режимах регулирования частоты вращения, «фрезерования льда» и «заклинивания», а также в режиме изменения направления вращения (реверса). Диаграммы, полученные в ходе компьютерного моделирования, приведены на рис. 7–12.

На рис. 7 представлены диаграммы изменения частоты вращения, суммарного электромагнитного момента ГЭД, а также электромагнитных моментов каждой из двух АЭМ, снятые в режимах пуска и разгона до частоты вращения 5,23 1/с (50 об/мин) и перехода в режимы «фрезерования льда» и заклинивания. На рис. 8 показана диаграмма изменения разности действующих значений токов, которые потребляются одноименными фазами обмоток статора двух АЭМ, образующих ГЭД, снятая в перечисленных выше режимах. Из приведенных диаграмм следует, что введение корректировки сигналов задания электромагнитных моментов:

- обеспечивает требуемый закон изменения частоты вращения и суммарного электромагнитного момента, развиваемого обеими АЭМ (верхние и средние диаграммы, показанные на рис. 5 и 7, идентичны);
- производит разбалансировку электромагнитных моментов АЭМ, что особенно заметно в режимах «фрезерования льда» и «заклинивания»;
- осуществляет выравнивание действующих значений фазных токов, потребляемых АЭМ от ПЧ (разность токов в самом напряженном режиме «заклинивания» не превышает 4 А). Без введения корректировки эта разность действующих значений токов в режиме «заклинивания» составляет 190 А (рис. 4).

Кроме режимов «фрезерования льда» и «заклинивания» критичным для ПЧ в части перегрузки по току является режим реверса ГВ. На рис. 9, 10 показаны аналогичные диаграммы электромеханических

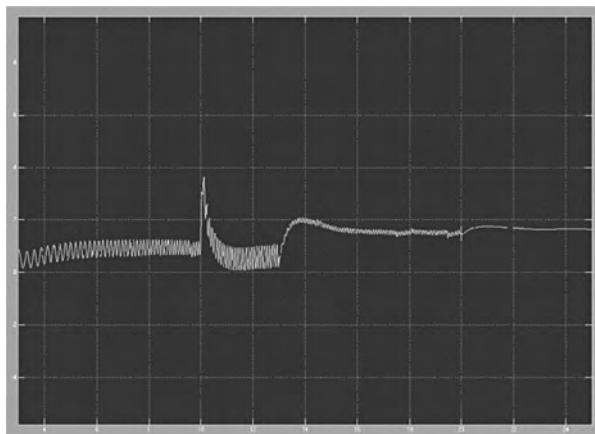


Рис. 8. Диаграмма изменения разности токов, потребляемых одноименными фазами обмоток статора двух асинхронных машин, образующих ГЭД. Режим пуска и разгона до частоты вращения 5,23 1/с с последующим переходом в режимы «фрезерования льда» и стоянки под током

Fig. 8. Variation diagrams for the difference of actual currents consumed by the same phases of stator coils, for the two asynchronous motors making up the assembly. Conditions: launching and acceleration up to the speed of 5.23 1/s with subsequent transition to ice milling and standby under current

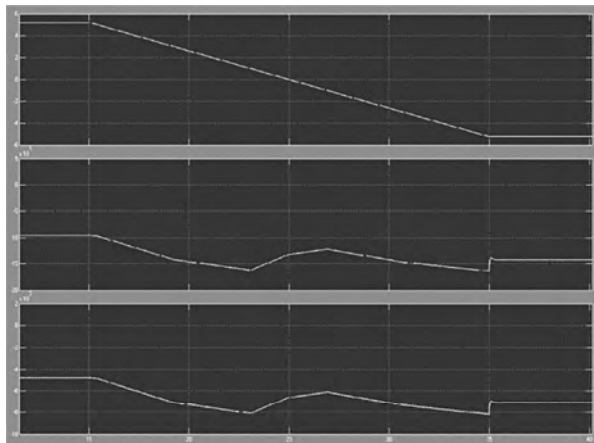


Рис. 9. Диаграммы изменения (сверху вниз) частоты вращения и суммарного электромагнитного момента ГЭД, а также электромагнитных моментов каждой из двух АЭМ, образующих ГЭД. Режим изменения частоты вращения от 5,23 1/с до -5,23 1/с

Fig. 9. Variation diagrams (from top to bottom) of total RPM and electromagnetic torque of asynchronous motor assembly, as well as electromagnetic moments for each of its two asynchronous motors. Conditions: speed variation within the range from 5.23 1/s to -5.23 1/s

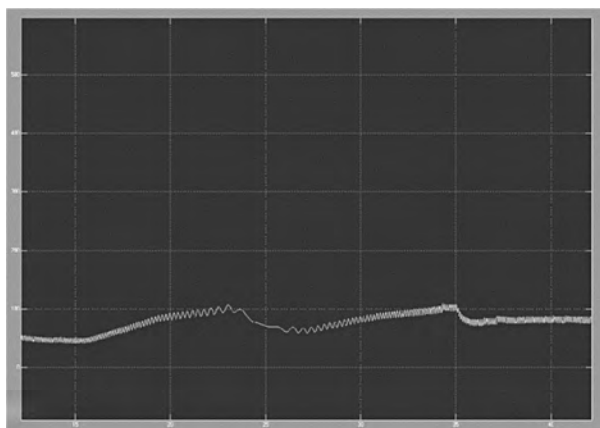


Рис. 10. Диаграмма изменения разности токов, потребляемых одноименными фазами обмоток, уложенных на статорах АЭМ, образующих ГЭД. Режим изменения частоты вращения от 5,23 1/с до -5,23 1/с (режим реверса) при ходе в свободной воде

Fig. 10. Variation diagrams for the difference of actual currents consumed by the same phases of stator coils, for the two asynchronous motors making up the assembly. Conditions: speed variation within the range from 5.23 1/s to -5.23 1/s (crash stop) running in open water

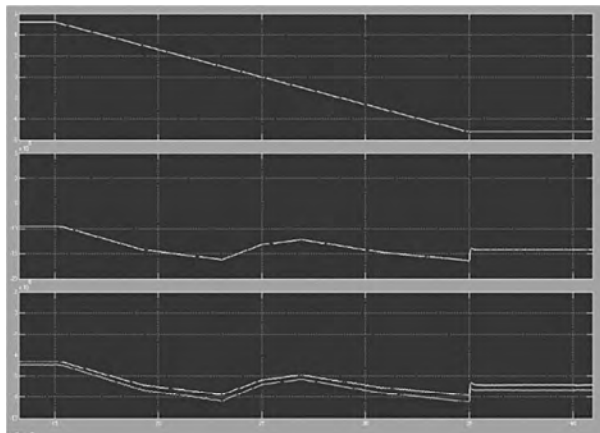


Рис. 11. Диаграммы изменения (сверху вниз) частоты вращения и суммарного электромагнитного момента ГЭД, а также электромагнитных моментов каждой из двух АЭМ, образующих ГЭД. Режим изменения частоты вращения от 5,23 1/с до -5,23 1/с

Fig. 11. Variation diagrams (from top to bottom) of total RPM and electromagnetic torque of asynchronous motor assembly, as well as electromagnetic moments for each of its two asynchronous motors. Conditions: speed variation within the range from 5.23 1/s to -5.23 1/s

процессов, протекающих в ГЭД при реверсе. Диаграммы сняты в процессе изменения частоты вращения от 5,23 1/с (50 об/мин) до -5,23 1/с (-50 об/мин). Моделирование реверса производилось в режиме хода ледокола в свободной воде (корректировка задания электромагнитных моментов АЭМ при этом не производилась).

На рис. 11, 12 представлены диаграммы электромеханических процессов, снятые в аналогичных режимах, при действующей в ЭП корректировке электромагнитных моментов АЭМ. Из сопоставления представленных диаграмм следует:

- изменение частоты вращения и суммарного электромагнитного момента ГЭД в процессе реверса происходит в обоих случаях одинаково (верхние и средние диаграммы на рис. 11 и 12 идентичны);
- использование корректировки вызывает необходимую разбалансировку электромагнитных моментов, развиваемых АЭМ1 и АЭМ2, которая обеспечивает выравнивание действующих значений потребляемых ими токов (при отсутствии корректировки разность потребляемых токов составляет 100 А, при ее наличии разность снижается до 1 А).

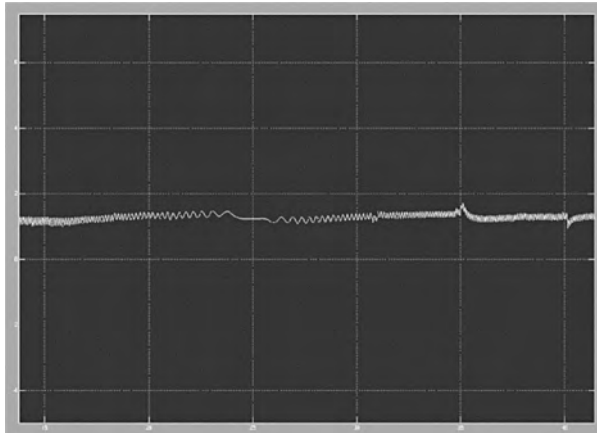


Рис. 12. Диаграмма изменения разности токов, потребляемых одноименными фазами обмоток статора двух АЭМ, образующих ГЭД. Режим изменения частоты вращения от 5,23 1/с до -5,23 1/с

Fig. 12. Variation diagrams for the difference of actual currents consumed by the same phases of stator coils, for the two asynchronous motors making up the assembly. Conditions: speed variation within the range from 5.23 1/s to -5.23 1/s

Гребные ЭП одного из ледоколов проекта 22220 в настоящее время изготовлены в филиале «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр» и поставлены для ООО «Балтийский завод – Судостроение». Эффективность технических решений, предлагаемых авторами настоящей статьи, будет проверена в процессе пуско-наладочных работ, предшествующих приемочным испытаниям и сдаче ледокола в эксплуатацию.

Библиографический список

References

1. Вершинин В.И., Махонин С.В., Паршиков В.А., Хомяк В.А. Алгоритм управления гребным электроприводом универсального атомного ледокола проекта 22220 // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 4(382). С. 95–102. [V. Vershinin, S. Makhonin, V. Parshikov, V. Khomyak. Control algorithm for electric propulsion drive of Project 22220 multi-purpose nuclear icebreaker // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2017; 4(382): 95–102. (in Russian)].
2. Рудаков В.В., Столяров И.М., Дартау В.А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. Л.: Энергоатомиздат, 1987. [V. Rudakov, I. Stolyarov, V. Dartau. Asynchronous electric drives with vector control. Leningrad: Energoatomizdat, 1987. (in Russian)].
3. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением. М.: Академия, 2007. [G. Sokolovsky. AC drives with frequency control. Moscow: Akademiya, 2007. (in Russian)].
4. Вершинин В.И., Махонин С.В., Паршиков В.А., Хомяк В.А. Компьютерная модель гребного электропривода универсального атомного ледокола проекта 22220 // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Вып. 1(383). С. 89–100. [V. Vershinin, S. Makhonin, V. Parshikov, V. Khomyak. Computer-based model of electric propulsion drive for Project 22220 multi-purpose nuclear icebreaker // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 1(383): 89–100. (in Russian)].
5. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. М.: Энергия, 1979. [M. Chilikin, V. Klyuchev, A. Sandler. Theory of automated electric drive. Moscow: Energiya, 1979. (in Russian)].

Сведения об авторах

Вершинин Виктор Иванович, инженер 1 категории НИО-12 филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6. Тел.: +7 (812) 748-52-44. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Махонин Сергей Васильевич, начальник сектора – заместитель начальника отдела НИО-12 филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6. Тел.: +7 (812) 748-52-44. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Паршиков Владимир Алексеевич, начальник отдела НИО-12 филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6. Тел.: +7 (812) 748-52-43. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Хомяк Валентин Алексеевич, начальник отдела – главный конструктор ЕЭЭС и ГЭУ филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6. Тел.: +7 (812) 748-52-30. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

About the authors

Vershinin, Viktor I., 1st Category Engineer, TSNII SET branch of KSRC. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: 8 (812) 748-52-44. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Makhonin, Sergey V., Head of Sector – Deputy Head of Department, TSNII SET branch of KSRC. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: 8 (812) 748-52-44. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Parshikov, Vladimir A., Head of Department, TSNII SET branch of KSRC. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: 8 (812) 748-52-43. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Khomyak, Valentin A., Head of Department – Chief Designer of IEPS and Electric Propulsion Plants, TSNII SET branch of KSRC. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: 8 (812) 748-52-30. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Поступила / Received: 15.01.18
Принята в печать / Accepted: 05.06.18
© Коллектив авторов, 2018