

УДК 621.438.13:621.57

А. Н. РАДЧЕНКО¹, Б. С. ПОРТНОЙ¹, А. И. ПРЯДКО¹, С. А. КАНТОР²¹ *Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Украина*² *ПАО "Завод "Экватор", Украина*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ КОНДЕНСАТА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

Путем компьютерного моделирования процессов получения конденсата как сопутствующего продукта двухступенчатого охлаждения воздуха на входе газотурбинной установки абсорбционной бромистолитиевой и хладоновой эжекторной холодильными машинами, использующими сбросную теплоту отработавших газов, получены данные по расходам и температуре конденсата, который предложено использовать в качестве хладоносителя. Приведен алгоритм обработки данных, полученных с использованием компьютерных программ фирм-разработчиков теплообменного оборудования теплоиспользующей системы охлаждения воздуха на входе газотурбинной установки трансформацией теплоты отработавших газов.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, алгоритм, двухступенчатое охлаждение воздуха, теплоиспользующая холодильная машина, конденсат.

1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

Повысить эффективность газотурбинных установок (ГТУ) при высоких температурах наружного воздуха на входе $t_{\text{нв}}$ можно путем его охлаждения теплоиспользующими холодильными машинами (ТХМ), трансформирующими в холод теплоту, например отработавших газов [1–4]. В абсорбционных бромистолитиевых холодильных машинах (АБХМ) воздух можно охладить до температуры $t_{\text{в2}} = 15 \dots 20 \text{ }^\circ\text{C}$ (температура охлажденной в АБХМ воды $t_{\text{в}} \approx 7 \dots 10 \text{ }^\circ\text{C}$) [1, 2], а в хладоновых эжекторных холодильных машинах (ЭХМ) – до $t_{\text{в2}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ и ниже (температуры кипения хладона в воздухоохладителях $t_0 = 2 \dots 4 \text{ }^\circ\text{C}$). Но тепловые коэффициенты ЭХМ невысокие: $\zeta_{\text{Э}} = 0,2 \dots 0,3$ по сравнению с $\zeta_{\text{А}} = 0,7 \dots 0,8$ для АБХМ, соответственно в 2–3 раза больше затраты теплоты на получение холода.

Сократить затраты теплоты на получение холода можно с помощью ТХМ комбинированного типа, в которых высокоэффективные АБХМ используют в качестве высокотемпературной ступени ВО_{ВТ} охлаждения воздуха от текущей температуры $t_{\text{нв}}$ до $t_{\text{в2}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, а менее эффективные ЭХМ – как низкотемпературную ступень ВО_{НТ} охлаждения воздуха после АБХМ до $t_{\text{в2}} = 7 \dots 10 \text{ }^\circ\text{C}$ [3, 4].

В процессе охлаждения воздуха на входе ГТУ в результате конденсации содержащихся в нем водяных паров образуется конденсат. Представляется целесообразным использование его охлаждающего

потенциала для охлаждения воздуха.

Программы фирм-разработчиков теплообменного оборудования (в частности, "Guntner" [5]) предназначены для проектирования и выбора теплообменников для конкретной тепловой нагрузки (тепловлажностных параметров наружного воздуха), а не для моделирования их работы при меняющихся климатических условиях. Для того чтобы воспользоваться ими, необходимо разработать программы подготовки исходных данных для этих программ (исходя из климатических характеристик ГТУ и расчетов текущих параметров наружного воздуха по программам, например "meteomanz"), а также обработки результатов расчетов по ним с целью получения характеристик процессов охлаждения воздуха с учетом меняющихся климатических условий, выявления резервов повышения эффективности охлаждения воздуха на входе ГТУ путем использования получаемого при этом конденсата.

Цель исследования – анализ возможности использования конденсата, полученного в процессе двухступенчатого охлаждения воздуха на входе ГТУ, в качестве хладоносителя по результатам компьютерного моделирования.

2. Результаты исследования

Алгоритм расчета процессов охлаждения воздуха на входе ГТУ с получением конденсата приведен на рис. 1.

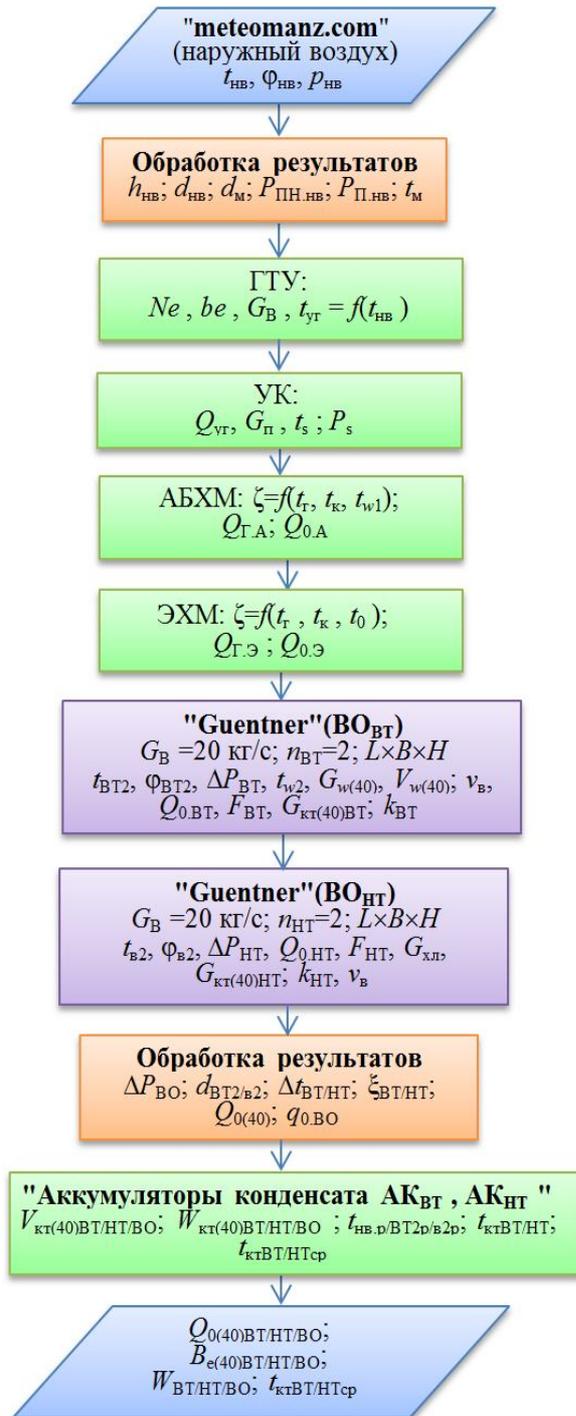


Рис. 1. Алгоритм расчета процессов охлаждения воздуха на входе ГТУ с получением конденсата

На рис. 2 приведены результаты расчета параметров процесса охлаждения воздуха на входе ГТУ UGT 10000 производства ГП НПКГ "Зоря"- "Машпроект" (мощностью $N_e = 10$ МВт) в двухступенчатом ВО с получением конденсата для двух вариантов проектных удельных тепловых нагрузок ступеней охлаждения: $q_{0.вт} \approx q_{0.нт} \approx 17$ кВт/(кг/с); $q_{0.вт} \approx 10$ кВт/(кг/с) и $q_{0.нт} = 24$ кВт/(кг/с) при сум-

марной удельной тепловой нагрузке двухступенчатого ВО $q_0 = 34$ кВт/(кг/с) и климатических условий г. Южноукраинск, Николаевская обл. (8.07.2015).

При разных соотношениях проектных удельных тепловых нагрузок $q_{0.вт}$ и $q_{0.нт}$ количество конденсата, полученного за сутки как сопутствующего продукта процесса охлаждения воздуха в двухступенчатом ВО и его ступенях ВО_{вт} и ВО_{нт}, довольно существенное и составляет (при $G_v = 40$ кг/с для ГТУ UGT 10000 кВт) соответственно $W \approx 16,5$ м³, $W_{вт} \approx 4$ м³, $W_{нт} \approx 12,5$ м³ при $q_{0.вт} = 10$ кВт/(кг/с) и $q_{0.нт} = 24$ кВт/(кг/с) (рис. 2,а) и $W \approx 14,5$ м³, $W_{вт} \approx 6,5$ м³, $W_{нт} \approx 8$ м³ при $q_{0.вт} \approx q_{0.нт} \approx 17$ кВт/(кг/с) (рис. 2,б).

При этом средняя температура конденсата, меняется в течение суток незначительно: $t_{ктвт_ср} \approx 14,5 \dots 15,5$ °С и $t_{ктнт_ср} \approx 11,5$ °С, причем при повышенной проектной удельной тепловой нагрузке $q_{0.вт} \approx 17$ кВт/(кг/с), соответственно и большей поверхности ВО_{вт}, температура конденсата на выходе из ВО_{вт} примерно на 1 °С ниже по сравнению $q_{0.вт} \approx 10$ кВт/(кг/с): $t_{ктвт_ср} \approx 14,5$ °С против $t_{ктвт_ср} \approx 15,5$ °С. Суточное накопление конденсата в ВО_{вт} также больше: $W_{вт} \approx 6,5$ м³ при $q_{0.вт} \approx 17$ кВт/(кг/с) против $W_{вт} \approx 4$ м³ при $q_{0.вт} \approx 10$ кВт/(кг/с). В то же время при практически одинаковой температуре конденсата, получаемого в ВО_{нт}, его количество при $q_{0.нт} \approx 17$ кВт/(кг/с) значительно меньше, чем при $q_{0.нт} \approx 24$ кВт/(кг/с): $W_{нт} \approx 8$ м³ против $W_{нт} \approx 12,5$ м³, что вполне очевидно, поскольку в первом случае поверхность ВО_{нт} меньше. Однако при этом следует учитывать также затраты теплоты на получение холода в ВО_{нт}, которые при одной и той же холодопроизводительности q_0 в 2–3 раза больше по сравнению с их величиной для ВО_{вт}, поскольку тепловые коэффициенты ЭХМ соответственно намного меньше, чем АБХМ: $\zeta_{э} = 0,2 \dots 0,3$ по сравнению с $\zeta_{а} = 0,7 \dots 0,8$.

О количестве и температуре конденсата, полученного за 3 суток можно судить по результатам моделирования, приведенным на рис. 3.

Как видно, количество конденсата, полученного за 3 суток в двухступенчатом ВО и его ступенях ВО_{вт} и ВО_{нт} составляет (при $G_v = 40$ кг/с для ГТУ UGT 10000 кВт) соответственно $W \approx 37$ м³, $W_{вт} \approx 9$ м³, $W_{нт} \approx 28$ м³ при $q_{0.вт} = 10$ кВт/(кг/с) и $q_{0.нт} = 24$ кВт/(кг/с) (рис. 3,а) и $W \approx 33$ м³, $W_{вт} \approx 15$ м³, $W_{нт} \approx 18$ м³ при $q_{0.вт} \approx q_{0.нт} \approx 17$ кВт/(кг/с) (рис. 2,б). Средняя температура конденсата, меняется в течение 3 суток незначительно: $t_{ктвт_ср} \approx 15$ °С и $t_{ктнт_ср} \approx 11$ °С.

То обстоятельство, что средняя температура $t_{ктнт_ср}$ конденсата, получаемого в ВО_{нт}, примерно на 4 °С ниже ее величины $t_{ктвт_ср}$ для ВО_{вт} (рис. 3), подтверждает необходимость дифференцированного

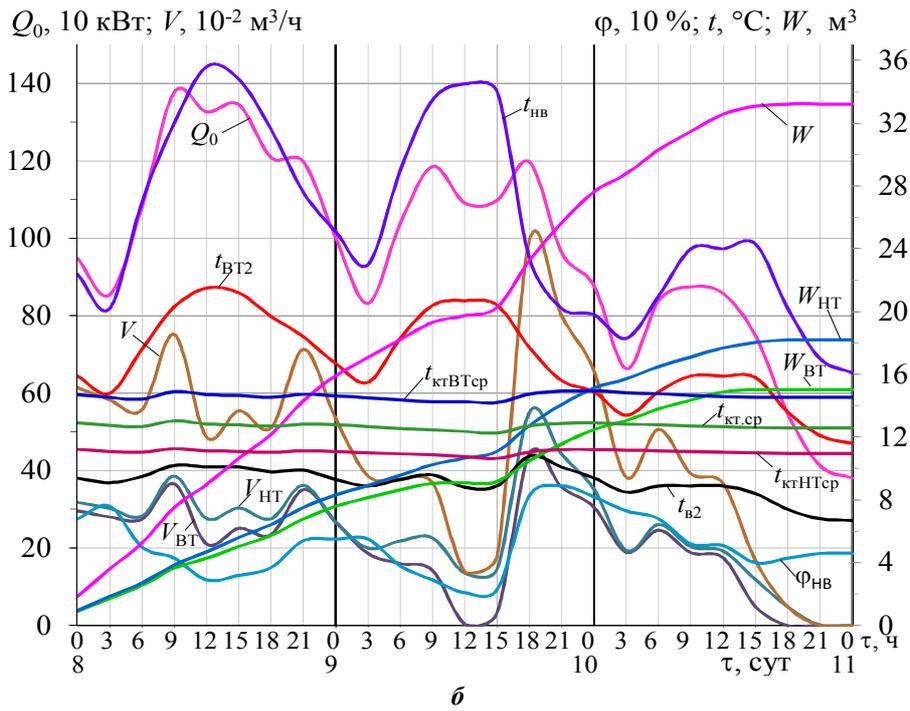
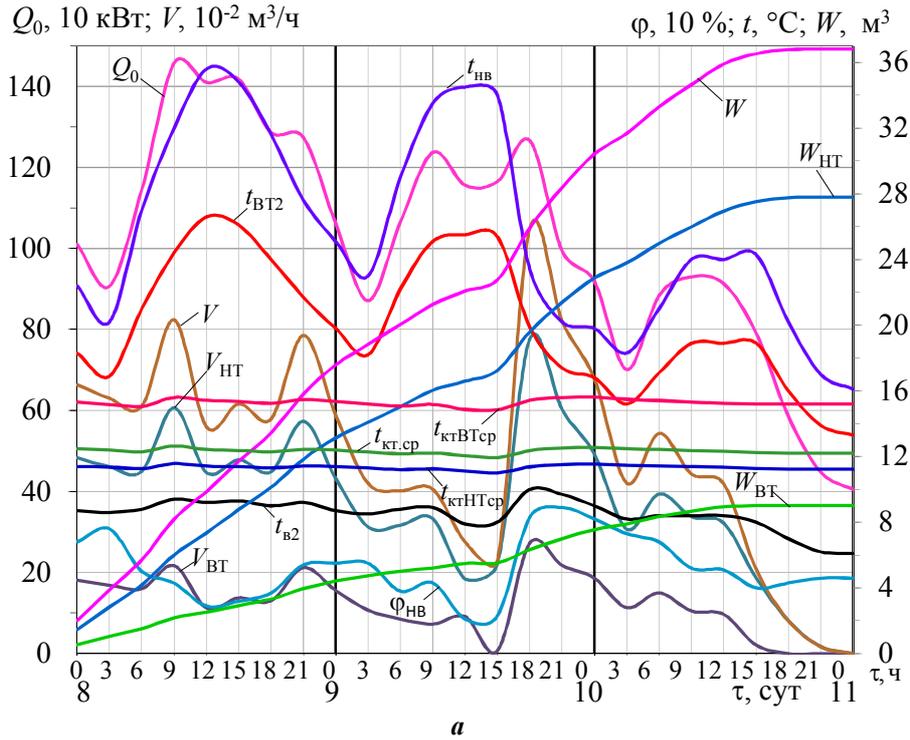


Рис. 3. Текущие значения температуры $t_{нв}$ и относительной влажности $\phi_{нв}$ наружного воздуха, температуры $t_{вт2}$ на выходе из $ВО_{вт}$ и $t_{в2}$ на выходе из $ВО_{нт}$, тепловой нагрузки Q_0 на весь $ВО$, часовых расходов конденсата $V_{вт}$, выпадающего в $ВО_{вт}$, $V_{нт}$ – в $ВО_{нт}$, V – в двухступенчатом $ВО$, а также соответствующие количества накапливаемого конденсата в течение 3 суток (8–10.07.2015) $W_{вт}$ – в $ВО_{вт}$, $W_{нт}$ – в $ВО_{нт}$, W – в двухступенчатом $ВО$, текущей температуры конденсата $t_{ктвт}$, полученного в $ВО_{вт}$ с расходом $V_{вт}$, конденсата $t_{ктнт}$, полученного в $ВО_{нт}$ с расходом $V_{нт}$, и текущей средней температуры конденсата $t_{кт}$ с расходом V , а также средней температуры конденсата $t_{ктвтср}$, полученного в $ВО_{вт}$ в количестве $W_{вт}$, конденсата $t_{ктнтср}$, полученного в $ВО_{нт}$ в количестве $W_{нт}$, и средней температуры конденсата $t_{кт}$ в количестве W при проектных удельных тепловых нагрузках ступеней охлаждения:
a – $q_{0.вт} = 10$ кВт/(кг/с); $q_{0.нт} = 24$ кВт/(кг/с); $q_0 = 34$ кВт/(кг/с); **б** – $q_{0.вт} \approx q_{0.нт} \approx 17$ кВт/(кг/с)

Так, конденсат с повышенной температурой может быть использован для подпитки градиентной системы оборотного охлаждения конденсаторов АБХМ и ЭХМ, а конденсат с пониженной температурой – как хладоноситель для ВО_{ВТ}.

Выводы

По результатам компьютерного моделирования процессов двухступенчатого охлаждения воздуха на входе ГТУ получены данные по текущим расходам и температуре конденсата, отводимого в ступенях воздухоохлаждителя ВО_{ВТ} и ВО_{НТ}, а также по их накоплению в течение суток. Их анализ показал, что температура конденсата, получаемого в ВО_{НТ}, примерно на 4 °С ниже, чем для ВО_{ВТ} и составляет около 11 °С, что позволяет использовать его в качестве хладоносителя.

Литература

1. Popli, S. *Trigeneration scheme for energy efficiency enhancement in a natural gas processing plant through turbine exhaust gas waste heat utilization* [Text] / Sahil Popli, Peter Rodgers, Valerie Evely // *Applied Energy*. – 2012. – №93. – С. 623–636.

2. Popli, S. *Gas turbine efficiency enhancement using waste heat powered absorption chillers in the oil and gas industry* [Text] / Sahil Popli, Peter Rodgers, Valerie Evely // *Applied Thermal Engineering*. – 2013. – №50. – Р. 918–931.

3. Радченко, А.Н. *Методологический подход к рациональному проектированию комбинированной теплоиспользующей системы охлаждения воздуха на входе газотурбинной установки* [Текст] / А.Н. Радченко, С.А. Кантор // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 4(121). – С. 76–79.

4. Радченко, А.Н. *Метод выбора рациональной тепловой нагрузки абсорбционно-эжекторного термотрансформатора охлаждения воздуха на входе регенеративных ГТУ компрессорных станций*

[Текст] / А.Н. Радченко, С.А. Кантор // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 5(122). – С. 61–64.

5. Hans Güntner GmbH [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.guntner.su/>; <http://www.guentner.de: Güntner Product Calculator>. – 7.08.2016.

References

1. Sahil Popli, Peter Rodgers, Valerie Evely *Trigeneration scheme for energy efficiency enhancement in a natural gas processing plant through turbine exhaust gas waste heat utilization*. *Applied Energy*, 2012, no. 93, pp. 623–636.

2. Sahil Popli, Peter Rodgers, Valerie Evely *Gas turbine efficiency enhancement using waste heat powered absorption chillers in the oil and gas industry*. *Applied Thermal Engineering*, 2013, no. 50, pp. 918–931.

3. Radchenko, A.N., Kantor, S.A. *Metodologicheskiy podhod k racionalnomu proektirovaniyu kombinirovannoi teploispolzuyushchey sistemy okhlazhdeniya vozdukha na vhode gazoturbinnoy ustanovki* [Methodological approaches of rational designing of combined waste heat recovery system for gas turbine unit intake air cooling]. *Avitsionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya – Aerospace technics and technology*, 2015, no. 4 (121), pp. 76–79.

4. Radchenko, A.N., Kantor, S.A. *Metod vybora racionalnoy teplovoy nagruzky absorbcionno-ezhektornogo termotransformatora okhlazhdeniya vozdukha na vhode regenerativnyh GTU kompressornyh stanciy* [The method of evaluation of rational heat load on absorption-ejector thermotransformer for cooling regenerative GTU intake air of compressor stations]. *Avitsionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya – Aerospace technics and technology*, 2015, no. 5 (122), pp. 61–64.

5. Hans Güntner GmbH. Available at: <http://www.guntner.su/>; <http://www.guentner.de: Güntner Product Calculator>. (Accessed 7.08.2016).

Поступила в редакцию 12.08.2017, рассмотрена на редколлегии 14.09.2017

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОТРИМАННЯ КОНДЕНСАТУ ПРИ ОХОЛОДЖЕННІ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ ГАЗОТУРБІННОЇ УСТАНОВКИ

А. М. Радченко, Б. С. Портной, О. І. Прядко, С. А. Кантор

Шляхом комп'ютерного моделювання процесів отримання конденсату як супутнього продукту двоступінчастого охолодження повітря на вході газотурбінної установки абсорбційною бромистолітєвою і хладоною ежекторною холодильними машинами, що використовують скидку теплоту відпрацьованих газів, отримані дані з витрати та температури конденсату, який запропоновано використовувати як холодоносій.

Наведений алгоритм обробки даних, отриманих з використанням комп'ютерних програм фірм-розробників теплообмінного обладнання тепловикористовуючої системи охолодження повітря на вході газотурбінної установки трансформацією теплоти відпрацьованих газів.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, алгоритм, двоступеневе охолодження повітря, тепловикористовуюча холодильна машина, конденсат.

SIMULATION OF CONDENSATE PRODUCING PROCESSES DURING GAS TURBINE UNIT INTAKE AIR COOLING*A. N. Radchenko, B. S. Portnoi, A. I. Prjadko, S. A. Kantor*

The processes of gas turbine unit intake air cooling with producing the condensate as a subproduct were simulated with using the computer programs of the firms-producers of the heat equipment for gas turbine unit intake air cooling waste heat recovery system with exhaust gas heat conversion. The heat-humidity processes in the two-stage air cooler of combined type with water stage of precooling air to the temperature not lower than 15 °C and refrigerant stage of further deep cooling air to the temperature about 10 °C by utilizing the exhaust gas waste heat in the absorption lithium-bromide chiller as the high temperature cooling stage and refrigerant ejector chiller as the low temperature cooling stage of the combined thermotransformer has been analyzed for daily changing ambient air temperatures and heat loads on the stages as consequence. The algorithm for treatment of data received by using the computer simulation programs of the firms-producers of the heat equipment for gas turbine unit intake air cooling waste heat recovery system with exhaust gas heat conversion is presented. The processes of producing the condensate as a subproduct of gas turbine unit intake air two-stage cooling were simulated for two variants of design heat loads upon air cooler stages: for approximately equal heat loads upon the air cooler stages and for more than twice decreased heat load upon the high temperature cooling stage as compared with a heat load upon the low temperature cooling stage. The data about hourly amount of condensate extracted in each air cooler stage was summed up over a day and its temperature was calculated. The results of calculation have shown that the temperature of condensate received in the refrigerant low temperature cooling stage are lower by 3...4 °C as compared with its value for high temperature cooling stage with a chilled water temperature of 7 °C from absorption lithium-bromide chiller. It was also shown that the temperature of condensate from both stages of a combined two-stage air cooler remained nearly unchangeable during days. A conclusion about using the condensate from low temperature cooling stage as a coolant has been made.

Keywords: computer simulation, algorithm, two stage air cooling, waste heat recovery chiller, condensate.

Радченко Андрей Николаевич – канд. техн. наук, доц., Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: nirad50@gmail.com, andrad69@mail.ru.

Портной Богдан Сергеевич – аспирант, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail:

Прядко Александр Игоревич – аспирант, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина.

Кантор Сергей Анатольевич – канд. техн. наук, инженер-механик, ПАО "Завод "Экватор", Николаев, Украина, e-mail: s_kantor@mail.ru.

Radchenko Andrey Nikolaevich – Ph.D., Assistant Professor of Dept. of Ship Electroenergetic Systems, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com, andrad69@mail.ru.

Portnoy Bogdan Sergeevich – Ph.D.-student, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail:

Prjadko Alexandr Igorevich – Ph.D.-student, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine.

Кантор Сергей Анатольевич – Ph.D., Engineer, PJSC "Zavod "Ekvator", Mykolaiv, Ukraine, e-mail: s_kantor@mail.ru.