

УДК 621.512-714

doi: 10.32620/aktt.2018.6.04

Е. И. ТРУШЛЯКОВ, Н. И. РАДЧЕНКО, В. С. ТКАЧЕНКО

*Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Украина*

## ПОДХОД К АНАЛИЗУ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ХОЛОДОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ПРИТОЧНОГО ВОЗДУХА

*Показано, что эксплуатация систем кондиционирования приточного воздуха (СКПВ) отличается значительными колебаниями тепловой нагрузки в соответствии с текущими климатическими условиями. Это делает весьма проблематичным применение в них холодильных компрессоров с преобразователями частоты, весьма эффективными при регулировании холодопроизводительности в замкнутых системах кондиционирования воздуха, в которых диапазон регулирования температуры и, соответственно, колебания тепловой нагрузки сравнительно незначительны по сравнению с охлаждением наружного воздуха. С целью анализа эффективности регулирования холодопроизводительности СКПВ изменением скорости вращения электродвигателя поршневого компрессора в конкретных климатических условиях весь диапазон изменения текущих тепловых нагрузок был разбит на две области в соответствии с регулированием холодопроизводительности с помощью преобразователя частоты: на область эффективного регулирования холодопроизводительности без энергетических потерь (без уменьшения холодильного коэффициента) от номинального до ее порогового значения и область пониженной холодопроизводительности, не регулируемой частотным преобразователем. Показано, что для самого теплого летнего месяца доля холода, расходуемого на охлаждение наружного воздуха до температуры 10 °С при частотном 50 % регулировании холодопроизводительности, составляет около 10 % всего его количества, которое могло быть произведено при номинальной нагрузке. При более высоких температурах охлажденного воздуха, как и в более прохладные периоды даже летних месяцев, она еще меньше. Это свидетельствует о невысокой эффективности регулирования холодопроизводительности СКПВ изменением скорости вращения электродвигателя поршневого компрессора и необходимости применения других способов регулирования. Предложенный подход к анализу эффективности регулирования холодопроизводительности СКПВ в конкретных климатических условиях позволяет не только оценить эффективность того или иного способа регулирования, но и выявить резервы повышения эффективности использования установленной холодопроизводительности.*

**Ключевые слова:** кондиционирование; приточный воздух; холодопроизводительность; климат.

### 1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

Эксплуатация систем кондиционирования приточного воздуха (СКПВ) отличается значительными колебаниями тепловой нагрузки в соответствии с текущими климатическими условиями, которые определяются тепловлажностными параметрами наружного воздуха (температурой  $t_{нв}$  и относительной влажностью  $\phi_{нв}$ ) [1, 2]. В то же время работа замкнутых систем кондиционирования воздуха (тепловлажностной обработки воздуха помещений) характеризуется сравнительно незначительными колебаниями тепловой нагрузки на воздухоохладители (ВО), соответствующими изменению температуры воздуха в помещении в довольно узком диапазоне (около 5 °С) по сравнению с охлаждением наружного воздуха. Для таких замкнутых систем кондиционирования воздуха весьма эффективно применение компрессоров с преобразователями частоты, которые обеспечивает регулирование хо-

лодопроизводительности от номинальной (спецификационной) до 50 % номинальной и даже ниже. При этом за счет изменения скорости вращения электродвигателя поршневого компрессора давление всасывания, соответственно и температура кипения хладона в испарителе-воздухоохладителе поддерживаются постоянными, что обеспечивает эффективную работу компрессора без уменьшения холодильного коэффициента (coefficient of performance - COP), соответственно и без увеличения удельного (на единицу генерируемой холодопроизводительности) энергопотребления при снижении тепловой нагрузки до 50 % номинальной. Однако стоимость компрессоров с преобразователями частоты в 3...5 раз выше таковых без него.

**Цель исследования** – разработать подход к анализу эффективности регулирования холодопроизводительности компрессора СКПВ с преобразователем частоты для конкретных климатических условий.

## 2. Результаты исследования

Для удобства пересчета на другие холодопроизводительности СКПВ тепловые нагрузки удобно представлять в относительных (удельных) величинах, приходящихся на единичный расход воздуха ( $G_B = 1 \text{ кг/с}$ ) – в виде удельной тепловой нагрузки, или холодопроизводительности холодильной машины (ХМ),  $q_0 = Q_0 / G_B$ , кВт/(кг/с), или кДж/кг, где  $Q_0$  – полная тепловая нагрузка (холодопроизводительность) при охлаждении воздуха расходом  $G_B$ .

Для климатических условий юга Украины при охлаждении воздуха до температуры  $t_{B2} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  максимальная удельная годовая выработка холода  $\sum(q_0 \cdot \tau)$  имеет место при удельной (при  $G_B = 1 \text{ кг/с}$ ) холодопроизводительности  $q_0 \approx 34 \text{ кВт/(кг/с)}$ , которую принимают за рациональную  $q_{0,\text{рац}}$  [3].

Текущие значения температуры наружного воздуха  $t_{\text{нв}}$ , удельных тепловых нагрузок на ВО СКПВ  $q_{0,10}$ , расходования удельной холодопроизводительности в области ее частотного регулирования  $q_{0,10/2\text{рег}>0} = q_{0,10} - q_{0,10\text{рац}/2} \geq 0$  (положительные значения в области регулируемой холодопроизводительности от 100 до 50 % – выше  $q_{0,10\text{рац}/2}$  на рис. 1, а), а также вне области ее частотного регулирования  $q_{0,10/2\text{рег}<0} = q_{0,10\text{рац}/2} - q_{0,10} \geq 0$  (положительные значения в нерегулируемом диапазоне холодопроизводительности ниже 50 % – ниже  $q_{0,10\text{рац}/2}$  на рис. 1, б) при охлаждении наружного воздуха до температуры  $t_{B2} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  для климатических условий (г. Вознесенск, Николаевская обл., 2015 г.) приведены на рис. 1.

Расчеты проведены для  $q_{0,10\text{рац}} = 34 \text{ кВт/(кг/с)}$ , порогового значения  $q_{0,10\text{рац}}/2 \approx 17 \text{ кВт/(кг/с)}$ , соответствующего 50 % снижению номинальной (спецификационной) холодопроизводительности. Там же даны значения нереализованного избытка установленной холодопроизводительности ( $q_{0,10\text{рац}/2} - q_{0,10/2\text{рег}>0}$ ) в области ее частотного регулирования (выше  $q_{0,10\text{рац}/2}$  на рис. 1, а), ее избытка ( $q_{0,10\text{рац}/2} - q_{0,10/2\text{рег}<0}$ ) вне области ее регулирования (ниже  $q_{0,10\text{рац}/2}$  на рис. 1, б), а также суммарные по нарастающей значения расходования

$$\sum(q_{0,10/2\text{рег}>0} \cdot \tau) = \sum[(q_{0,10} - q_{0,10\text{рац}/2}) \cdot \tau] \geq 0$$

и избытка

$$\sum[(q_{0,10\text{рац}/2} - q_{0,10/2\text{рег}>0}) \cdot \tau] = q_{0,10} - q_{0,10\text{рац}/2} \geq 0$$

холодопроизводительности в области ее регулирования (выше  $q_{0,10\text{рац}/2}$  на рис. 1, а) и расходования

$$\sum(q_{0,10/2\text{рег}<0} \cdot \tau) = \sum[(q_{0,10\text{рац}/2} - q_{0,10}) \cdot \tau] \geq 0$$

и избытка установленной холодопроизводительности

$$\begin{aligned} \sum[(q_{0,10\text{рац}/2} - q_{0,10/2\text{рег}<0}) \cdot \tau] &= \\ &= \sum[(q_{0,10} - q_{0,10\text{рац}/2}) \cdot \tau] \geq 0 \end{aligned}$$

холодопроизводительности вне области ее регулирования (ниже  $q_{0,10\text{рац}/2}$  на рис. 1, б).

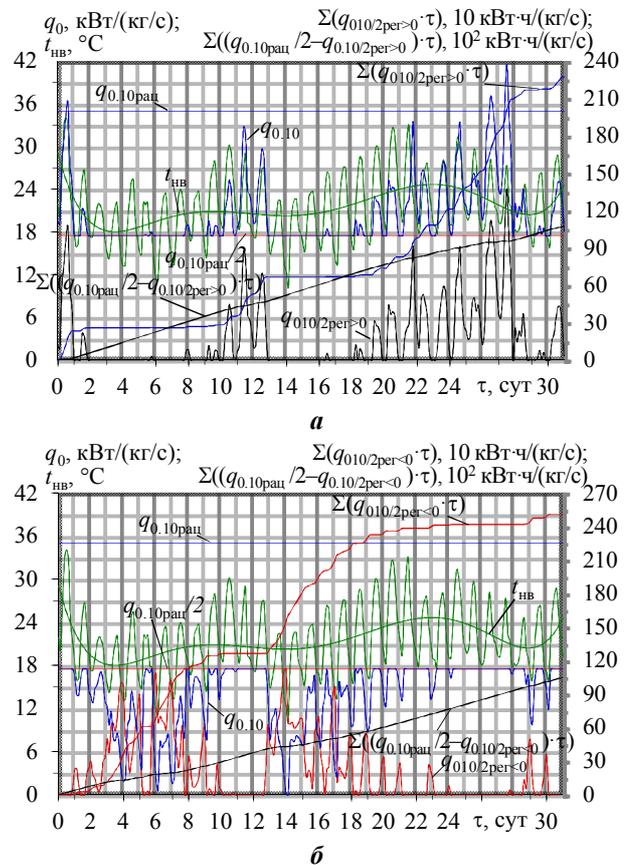


Рис. 1. Текущие значения температуры наружного воздуха  $t_{\text{нв}}$ , удельных тепловых нагрузок на ВО СКПВ  $q_{0,10}$ , расходования удельной холодопроизводительности  $q_{0,10/2\text{рег}>0}$  и нереализованного избытка установленной холодопроизводительности ( $q_{0,10\text{рац}/2} - q_{0,10/2\text{рег}>0}$ ), а также суммарных расходования  $\sum(q_{0,10/2\text{рег}>0} \cdot \tau)$  и избытка  $\sum[(q_{0,10\text{рац}/2} - q_{0,10/2\text{рег}>0}) \cdot \tau]$  холодопроизводительности в области ее частотного регулирования (а), текущих расходования  $q_{0,10/2\text{рег}<0}$  и избытка установленной холодопроизводительности ( $q_{0,10\text{рац}/2} - q_{0,10/2\text{рег}<0}$ ), а также суммарных расходования  $\sum(q_{0,10/2\text{рег}<0} \cdot \tau)$  и избытка  $\sum[(q_{0,10\text{рац}/2} - q_{0,10/2\text{рег}<0}) \cdot \tau]$  холодопроизводительности вне области ее регулирования (б) при охлаждении наружного воздуха от  $t_{\text{нв}}$  до  $t_{B2} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $q_{0,10/2\text{рег}>0} = q_{0,10} - q_{0,10\text{рац}/2} \geq 0$  (регулируемый диапазон);  $q_{0,10/2\text{рег}<0} = q_{0,10\text{рац}/2} - q_{0,10} \geq 0$  (нерегулируемый диапазон); пороговое значение  $q_{0,10\text{рац}}/2 \approx 17 \text{ кВт/(кг/с)}$

Как видно из рис. 1, доля производства холода при частотном 50% регулировании холодопроизводительности составляет:

$$\begin{aligned} \frac{\sum(q_{0,10/2\text{рег}>0} \cdot \tau)}{\sum(q_{0,10/2\text{рег}>0} \cdot \tau) +} \\ + \sum(q_{0,10/2\text{рег}<0} \cdot \tau)} \approx 0,47, \end{aligned}$$

т.е. около 47 % всего количества холода, затраченного на охлаждение воздуха в диапазоне изменения текущей тепловой нагрузки  $q_{0.10}$  от 0 до  $q_{0.10\text{рац}} = 34$  кВт/(кг/с).

В то же время, по отношению к нереализованному избытку установленной холодопроизводительности сверх расходуемой на охлаждение воздуха  $\sum[(q_{0.10\text{рац}}/2 - q_{0.10/2\text{пер}>0}) \cdot \tau] = q_{0.10} - q_{0.10\text{рац}}/2 \geq 0$  в области 50 % ее частотного регулирования доля производства холода составляет согласно рис. 1, а:  $2200/(2200+10500) \approx 0,17$ , т.е. около 17 %, и практически в два раза меньше ( $2200/[2(2200+10500)] \approx 0,087$ ) во всем диапазоне изменения текущей тепловой нагрузки  $q_{0.10}$  от 0 до  $q_{0.10\text{рац}} = 34$  кВт/(кг/с) для июля месяца.

Это свидетельствует, во-первых, о наличии значительных резервов повышения эффективности СКПВ путем реализации избытка установленной холодопроизводительности сверх расходуемой на охлаждение воздуха, в частности, его аккумуляцией для последующего расходования, что обеспечивает существенное сокращение установленной холодопроизводительности, а во-вторых, о возможности использования и других способов регулирования холодопроизводительности помимо изменением частоты вращения электродвигателя компрессора, например, перепуском паров хладона с нагнетания на всасывание, отключением цилиндров или всего компрессора в случае его работы в составе установки из нескольких компрессоров и т.п.

Понятно, что при эксплуатации СКПВ в июне или августе эффективность применения регулирования холодопроизводительности изменением частоты вращения электродвигателя поршневого компрессора будет еще ниже, а с учетом в 3-5 раз более высокой стоимости компрессоров с преобразователями частоты целесообразность их применения для СКПВ весьма проблематична.

При охлаждении наружного воздуха от  $t_{\text{нв}}$  до более высокой температуры  $t_{\text{в2}} = 20$  °С значительная доля нестабильной тепловой нагрузки переносится из регулируемой ее области

$$(q_{0.20/2\text{пер}>0} = q_{0.20} - q_{0.20\text{рац}}/2 \geq 0),$$

приходящейся на зону  $q_{0.20} \geq q_{0.20\text{рац}}/2$ , в область нерегулируемой тепловой нагрузки  $q_{0.20} \leq q_{0.20\text{рац}}/2$  (рис. 2).

Как видно из рис. 2, доля производства холода при частотном 50 % регулировании холодопроизводительности составляет:

$$\frac{\sum(q_{0.20/2\text{пер}>0} \cdot \tau)}{(\sum(q_{0.20/2\text{пер}>0} \cdot \tau) + \sum(q_{0.20/2\text{пер}<0} \cdot \tau))} \approx 0,05,$$

т.е. около 5 % всего количества холода, затраченного на охлаждение воздуха в диапазоне изменения текущей тепловой нагрузки  $q_{0.20}$  от 0 до  $q_{0.20\text{рац}} = 15$  кВт/(кг/с), что свидетельствует о крайне низкой эффективности регулирования холодопроизводительности СКПВ изменением скорости вращения электродвигателя поршневого компрессора и необходимости применения других способов регулирования.

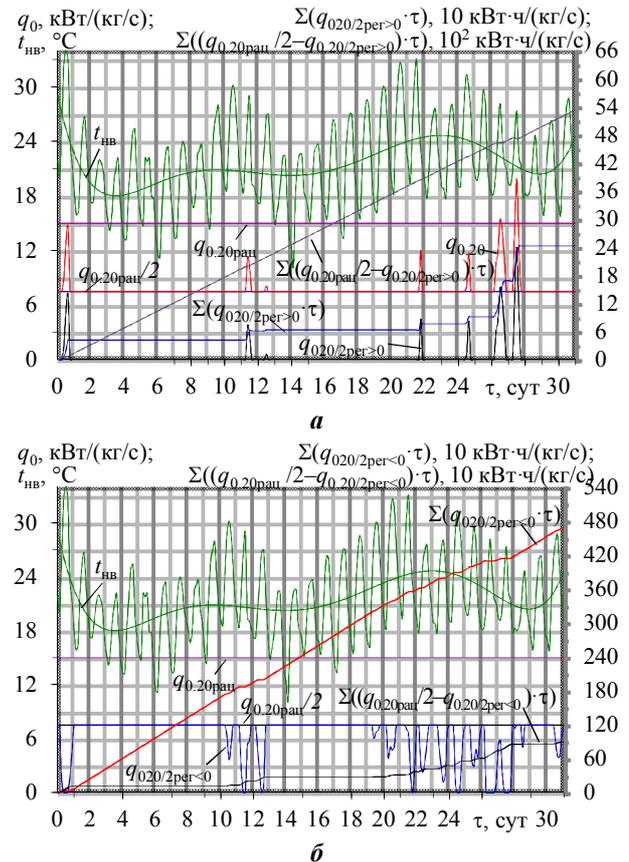


Рис. 2. Текущие значения температуры наружного воздуха  $t_{\text{нв}}$ , удельных тепловых нагрузок на ВО СКПВ  $q_{0.20}$ , расходования удельной холодопроизводительности  $q_{0.20/2\text{пер}>0}$  и нереализованного избытка установленной холодопроизводительности  $(q_{0.20\text{рац}}/2 - q_{0.20/2\text{пер}>0})$ , а также суммарных расходования  $\sum(q_{0.20/2\text{пер}>0} \cdot \tau)$  и избытка  $\sum[(q_{0.20\text{рац}}/2 - q_{0.20/2\text{пер}>0}) \cdot \tau]$  холодопроизводительности в области ее частотного регулирования (а), текущих расходования  $q_{0.20/2\text{пер}<0}$  и избытка установленной холодопроизводительности  $(q_{0.20\text{рац}}/2 - q_{0.20/2\text{пер}<0})$ , а также суммарных расходования  $\sum(q_{0.20/2\text{пер}<0} \cdot \tau)$  и избытка  $\sum[(q_{0.20\text{рац}}/2 - q_{0.20/2\text{пер}<0}) \cdot \tau]$  холодопроизводительности вне области ее регулирования (б) при охлаждении наружного воздуха от  $t_{\text{нв}}$  до  $t_{\text{в2}} = 20$  °С:  $q_{0.20/2\text{пер}>0} = q_{0.20} - q_{0.20\text{рац}}/2 \geq 0$  (регулируемый диапазон);  $q_{0.20/2\text{пер}<0} = q_{0.20\text{рац}}/2 - q_{0.20} \geq 0$  (нерегулируемый диапазон); пороговое значение  $q_{0.20\text{рац}}/2 \approx 7,5$  кВт/(кг/с)

## Выводы

Предложен методологический подход к анализу эффективности регулирования холодопроизводительности СКПВ в конкретных климатических условиях, согласно которому весь диапазон изменения текущих тепловых нагрузок разбивают на две области: область эффективного регулирования холодопроизводительности без энергетических потерь (без уменьшения холодильного коэффициента) и область пониженной нерегулируемой холодопроизводительности. Показано, что для самого теплого летнего месяца доля холода, расходуемого на охлаждение наружного воздуха до температуры 10 °С при частотном 50 % регулировании холодопроизводительности, составляет около 10 % всего его количества, которое могло быть произведено при номинальной нагрузке. При более высоких температурах охлажденного воздуха, как и в более прохладные периоды даже летних месяцев, она еще меньше. Это свидетельствует о невысокой эффективности регулирования холодопроизводительности СКПВ изменением скорости вращения электродвигателя поршневого компрессора и необходимости применения других способов регулирования. Предложенный подход позволяет не только оценить эффективность того или иного способа регулирования, но и выявить резервы повышения эффективности использования располагаемой установленной холодопроизводительности.

## Литература

1. *Thermodynamic analysis of trigeneration systems taking into account refrigeration, heating and electricity load demands [Text]* / R. P. Marques,

D. Hacon, A. Tessarollo, J. A. R. Parise // *Energy and Buildings*. – 2010. – Vol. 42. – P. 2323–2330.

2. *Ortiga, J. Operational optimisation of a complex trigeneration system connected to a district heating and cooling network [Text]* / Jordi Ortiga, Joan Carles Bruno, Alberto Coronas // *Applied Thermal Engineering*. – 2013. – Vol. 50. – P. 1536–1542.

3. *Радченко, А. Н. Оценка потенциала охлаждения воздуха на входе газотурбинных установок трансформацией теплоты отработанных газов в теплоиспользующих холодильных машинах [Текст]* / А. Н. Радченко, С. А. Кантор // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – № 4 (111). – С. 56–59.

## References

1. Marque, R. P., Hacon, D., Tessarollo, A., Parise, J. A. R. Thermodynamic analysis of trigeneration systems taking into account refrigeration, heating and electricity load demands. *Energy and Buildings*, 2010, vol. 42, pp. 2323–2330.

2. Ortiga, J., Bruno, J. C., Coronas, A. Operational optimisation of a complex trigeneration system connected to a district heating and cooling network. *Applied Thermal Engineering*, 2013, vol. 50, pp. 1536–1542.

3. Radchenko, A. N., Kantor, S. A. Otsenka potentsiala okhlazhdeniya vozdukh na vkhode gazoturbinnnykh ustanovok transformatsiya teploty otrabotannykh gazov v teploispol'zuyushchikh kholodil'nykh mashinakh [Evaluation of cooling potential of gas turbine unit intake air by transforming the exhaust gas heat in waste heat recovery cooling machines]. *Avitsionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya – Aerospace technics and technology*, 2014, no. 4 (111), pp. 56–59.

*Поступила в редакцию 15.10.2018, рассмотрена на редколлегии 12.12.2018*

## ПІДХІД ДО АНАЛІЗУ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ ХОЛОДОПРОДУКТИВНОСТІ СИСТЕМ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПРИТОЧНОГО ПОВІТРЯ

*Є. І. Трушляков, М. І. Радченко, В. С. Ткаченко*

Показано, що експлуатація систем кондиціонування приточного повітря (СКПП) відрізняється значними коливаннями теплового навантаження відповідно до поточних кліматичних умов. Це робить вельми проблематичним застосування в них холодильних компресорів з перетворювачами частоти, вельми ефективними при регулюванні холодопродуктивності замкнених систем кондиціонування повітря, в яких діапазон регулювання температури і, відповідно, коливання теплового навантаження порівняно незначний порівняно з охолодженням зовнішнього повітря. З метою аналізу ефективності регулювання холодопродуктивності СКПП зміною швидкості обертання електродвигуна поршневого компресора в конкретних кліматичних умовах весь діапазон зміни поточних теплових навантажень розбито на дві області відповідно до регулювання холодопродуктивності за допомогою перетворювача частоти: на область ефективного регулювання холодопродуктивності без енергетичних втрат (без зменшення холодильного коефіцієнта) від номінального до її порогового значення і область зниженої холодопродуктивності, що не регулюється частотним перетворювачем. Показано, що для самого теплого літнього місяця частка холоду, що витрачається на охолодження зовнішнього повітря до температури 10 °С при 50 % регулюванні холодопродуктивності, становить близько

10 % всієї його кількості, яка могла бути вироблена при номінальному навантаженні. При більш високих температурах охолодженого повітря, як і в більш прохолодні періоди навіть літніх місяців, вона ще менше. Це свідчить про невисоку ефективність регулювання холодопродуктивності СКПП зміною швидкості обертання електродвигуна поршневого компресора і необхідність застосування інших способів регулювання. Запропонований підхід до аналізу ефективності регулювання холодопродуктивності СКПП в конкретних кліматичних умовах дозволяє не тільки оцінити ефективність того чи іншого способу регулювання, а й виявити резерви підвищення ефективності використання встановленої холодопродуктивності.

**Ключові слова:** кондиціонування; припливне повітря; холодопродуктивність; клімат.

## APPROACH TO ANALYZING THE EFFICIENCY OF COOLING CAPACITY CONTROL OF AMBIENT AIR CONDITIONING SYSTEMS

*E. I. Trushliakov, M. I. Radchenko, V. S. Tkachenko*

It is determined that the operation of ambient air conditioning systems (AACS) has significant fluctuations in the heat load in accordance with current climatic conditions. This makes very problematic the application of refrigeration compressors with frequency converters, which are very effective for controlling the refrigeration capacity in closed air conditioning systems, in which the temperature control range and, accordingly, fluctuations in thermal load are insignificant in comparison with the ambient air cooling. For the purpose of analyzing the efficiency of controlling the refrigeration capacity of the AACS by changing the electric motor speed of the piston compressor in current climatic conditions, the entire range of changing current thermal loads is divided into two parts according to controlling the refrigeration capacity by applying a frequency converter: the part of effective cooling capacity adjustment without energy losses (without reducing the coefficient of performance) from nominal to its threshold value and the part of reduced refrigeration capacity without its controlling by a frequency converter. It is revealed that for the warmest summer month, the proportion of refrigeration capacity spent for cooling ambient air to the temperature of 10 °C with 50 % frequency controlling the refrigeration capacity is about 10 % of the total amount of that could be produced at nominal refrigeration capacity. At higher temperatures of cooled air is even less. This shows the low efficiency of controlling the refrigeration capacity of the AACS by changing the speed of rotation of the piston compressor electric motor and the need to use other methods of controlling the refrigeration capacity. The proposed approach to analyzing the efficiency of controlling the refrigeration capacity of AACS in current climatic conditions allows not only to estimate the efficiency of refrigeration capacity controlling method but also to reveal the reserves for increasing the efficiency of applying the available refrigeration capacity.

**Keywords:** conditioning; ambient air; refrigeration capacity; climate.

**Трушляков Євген Іванович** – канд. техн. наук, проф. Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

**Радченко Микола Іванович** – д-р техн. наук, проф. Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

**Ткаченко Веніамін Сергійович** – аспірант Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

**Trushliakov Eugeniy Ivanovych** – PhD, Professor of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: eugeniyt@gmail.com.

**Radchenko Mykola Ivanovych** – Doctor of Technical Science, Professor of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com.  
ORCID Author ID: 0000-0001-5796-5370.

**Tkachenko Veniamin Sergiyovych** – PhD Student, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: btd@zavod-ekvator.com.