

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF100464>

Анализ потерь в фанкойлах с помощью энтропийно-статистического метода

В.В. Осипенко¹, Н.А. Лавров²¹ ООО «ВЕЗА», Московская область, Россия² Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Системы с чиллерами и фанкойлами широко применяются в кондиционировании воздуха, именно поэтому представляется актуальным энтропийно-статистический анализ потерь энергии в канальном двухтрубном фанкойле с регулируемым расходом воздуха.

Цель настоящей работы – рассмотреть методику определения потерь с помощью энтропийно-статистического метода, произвести расчет потерь вследствие неидеальности теплообмена и гидравлических потерь в фанкойлах.

Материалы и методы. Определение потерь проводилось с помощью энтропийно-статистического метода.

Результаты и их применение. Проведен сравнительный анализ полученных результатов, представлены диаграммы распределения составляющих потерь и рекомендации для их уменьшения.

Ключевые слова: фанкойл, система кондиционирования, энтропийно-статистический анализ

Для цитирования:

Осипенко В.В., Лавров Н.А. Анализ потерь в фанкойлах с помощью энтропийно-статистического метода // *Холодильная техника*. 2022. Т. 111, № 1. С. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.17816/RF100464>

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF100464>

Analysis of losses in fan coil units by using the entropy-statistical method

Valentin V. Osipenko¹, Nikolai A. Lavrov²

¹ VEZA, Moscow Region, Russia

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Systems with chillers and fan coil units are widely used in air conditioning. Therefore, entropy-statistical analysis of energy losses in a duct-type two-pipe fan coil unit with controlled air flow is relevant.

AIM: This work aimed to review a method for determining losses by using the entropy-statistical method and to calculate losses due to non-ideal heat transfer and hydraulic losses in fan coil units.

MATERIALS AND METHODS: Losses were determined using the entropy-statistical method.

RESULTS: A comparative analysis of the results was performed. Diagrams of the distribution of loss components and recommendations for their reduction are presented.

Keywords: fan coil, air conditioning system, entropy-statistical analysis

To cite this article:

Osipenko VV, Lavrov NA. Analysis of loss in in fan coil units using an entropy and statistical method. *Refrigeration Technology*. 2022;111(1):5–12.
DOI: <https://doi.org/10.17816/RF100464>

Received: 09.02.2022

Accepted: 07.04.2022

Published: 24.08.2022

ВВЕДЕНИЕ

Экономия энергии – одна из основных задач современной науки и техники. Поскольку низкотемпературные установки потребляют 13–18% всей вырабатываемой в мире электроэнергии, снижение их энергопотребления за счет уменьшения имеющихся в них потерь – задача актуальная. Для анализа потерь в низкотемпературных установках наиболее эффективным методом признан метод энтропийного анализа [1], с помощью которого можно выполнить анализ потерь в отдельных частях холодильной установки [2–4], локализовать места наибольших потерь и выработать технические решения для их уменьшения [5–8].

Системы с чиллерами и фанкойлами [9] широко применяются в кондиционировании воздуха, поэтому анализ потерь в них имеет существенное значения для реализации мер по сокращению энергопотребления.

Рассмотрим фанкойл, в котором происходит охлаждение воздуха, движимого вентилятором. В качестве прототипа принимаем канальный двухтрубный фанкойл ВЕНДО-КС-10/2-Н с регулируемым расходом воздуха от 850 до 1700 м³/ч, производительностью на охлаждение 9,0 кВт, изображенный на рис. 1. Охлаждающая жидкость – вода.

Затрачиваемая на охлаждение воздуха работа L может быть разделена на две составляющие:

- минимальная (теоретическая) работа L_{min} , при которой процессы возможны только теоретически;
- работа на компенсацию потерь вследствие необратимости $\delta L_{потери}$:

$$L = L_{min} + \delta L_{потери}.$$

С точки зрения энтропийно-статистического метода, потери энергии пропорциональны производству энтропии.

Согласно теореме Гюи – Стодолы [1], потери энергии в системе $\delta L_{потери}$ за счет неравновесности

протекающих в ней процессов пропорциональны производству энтропии в системе $\Delta S'$:

$$\delta L_{потери} = T_{oc} \Delta S',$$

где T_{oc} — температура окружающей среды. Определение производства энтропии в отдельных частях установки позволяет найти наиболее энергозатратный элемент рассматриваемой системы и попытаться уменьшить необратимость в найденном элементе.

К потерям следует отнести следующие.

1. Потери из-за несовершенства теплообмена между охлаждающей жидкостью и воздухом в фанкойле.
2. Гидравлические потери при прохождении воздуха через фанкойл, которые выражаются через мощность вентилятора и кинетическую энергию выходящего воздуха.
3. Гидравлические потери при прохождении охлаждающей жидкости через теплообменник фанкойла, которые приводят к увеличению требуемой мощности жидкостного насоса.

Расчет потерь

1. Потери вследствие несовершенства теплообмена между охлаждающей жидкостью и воздухом в фанкойле.

Потери вследствие неидеальности теплообмена в фанкойле $\Delta S'_{то}$ можно рассчитать через производство энтропии как суммарное изменение энтропии воздушного потока $\Delta S'_B$ и охлаждающей жидкости $\Delta S'_ж$:

$$\Delta S'_{то} = \Delta S'_B + \Delta S'_ж, \quad (1)$$

$$\Delta S'_B = G_B C_{p,B} \ln \left(\frac{T_{B,ВЫХ}}{T_{B,ВХ}} \right), \quad (2)$$

$$\Delta S'_ж = G_ж C_{ж} \ln \left(\frac{T_{ж,ВЫХ}}{T_{ж,ВХ}} \right), \quad (3)$$

где $C_{p,g}$ и $C_ж$ – теплоемкости воздуха и жидкости в фанкойле соответственно; G_B и $G_ж$ – расходы воздуха и жидкости в фанкойле соответственно; $T_{B,ВХ}$ и $T_{B,ВЫХ}$, $T_{ж,ВХ}$ и $T_{ж,ВЫХ}$ – термодинамические температуры воздуха и жидкости на входе и выходе из фанкойла.

2. Гидравлические потери при прохождении воздуха через фанкойл выражаются через мощность вентилятора и кинетическую энергию выходящего воздуха:

$$\Delta S'_{вент} = \frac{N_{вент} - G_B v_{B,ВЫХ}^2 / 2}{T_{oc}}, \quad (4)$$

где $N_{вент}$ — мощность, потребляемая вентилятором, T_{oc} — термодинамическая температура окружающей



Рис. 1. Канальный двухтрубный фанкойл ВЕНДО-КС-10/2-Н.

Fig. 1. Duct-type two-pipe fan coil unit VENDO-KS-10/2-N.

среды. Массовый расход воздуха, проходящего через фанкойл G_v , рассчитывается по формуле

$$G_v = \rho_{v, \text{вых}} F v_{v, \text{вых}}, \quad (5)$$

где на выходе из фанкойла $\rho_{v, \text{вых}}$ — плотность воздуха при температуре и давлении, F — площадь проходного сечения, $v_{v, \text{вых}}$ — скорость воздуха.

Мощность, потребляемую вентилятором, можно определить как произведение действующего напряжения в сети U , от которого запитывается вентилятор (обычно 220 В/230 В), на действующее значение силы тока I в цепи вентилятора:

$$N_{\text{вент}} = UI. \quad (6)$$

3. Гидравлические потери при прохождении охлаждающей жидкости через теплообменник фанкойла, приводящие к увеличению потребляемой мощности жидкостного насоса:

$$\Delta S'_{\text{насоса}} = \frac{Q_{\text{нас}} \Delta p}{\eta_{\text{нас}} T_{\text{ос}}}, \quad (7)$$

где $\eta_{\text{нас}}$ — КПД насоса, $Q_{\text{нас}}$ — объемный расход жидкости, выходящей из насоса, м³/с, Δp — потеря напора жидкости при прохождении жидкостного

теплообменника в фанкойле, Па, $T_{\text{ос}}$ — температура окружающей среды, К.

Для измерения требуемых параметров использовалось следующее оборудование.

1. Термометры, измеряющие температуру воздуха на входе $T_{v, \text{вх}}$ и выходе $T_{v, \text{вых}}$ из фанкойла.
2. Термометры, измеряющие температуру охлаждающей жидкости на входе $T_{ж, \text{вх}}$ и выходе $T_{ж, \text{вых}}$ из фанкойла.
3. Манометры для измерения давления охлаждающей жидкости на входе $p_{ж, \text{вх}}$ и выходе $p_{ж, \text{вых}}$ из фанкойла.
4. Расходомер, измеряющий расход охлаждающей жидкости, протекающей через фанкойл. При пересчете использован объемный расход $Q_{ж}$.
5. Анемометры, измеряющие скорость воздуха на входе $v_{v, \text{вх}}$ и выходе $v_{v, \text{вых}}$ из фанкойла.
6. Амперметр для измерения силы тока в цепи вентилятора I .
7. Вольтметр для измерения напряжения в цепи вентилятора U .

Измерения проводились при следующих параметрах:

- давление жидкости на входе $p_{ж, \text{вх}} = 150$ Па;
- температура жидкости на входе в фанкойла $T_{ж, \text{вх}} = 7$ °С;
- температура жидкости на выходе из фанкойла $T_{ж, \text{вых}} = 12$ °С;
- напряжение $U = 220$ В;
- проходное сечение вход $0,24$ м²;
- проходное сечение выход $0,18$ м².

Таблица 1. Результаты измерений

Table 1. Measurement results

№	Время замера	Температура воздуха на входе, $T_{v, \text{вх}}$	Относительная влажность воздуха на входе, $\phi_{\text{вх}}$	Температура воздуха на выходе, $T_{v, \text{вых}}$	Относительная влажность, $\phi_{\text{нар. вых}}$	Давление жидкости на выходе, $P_{ж, \text{вых}}$	Объемный расход $Q_{ж}$	Расход воздуха	Скорость воздуха на входе $v_{v, \text{вх}}$	Скорость воздуха на выходе $v_{v, \text{вых}}$	Сила тока, I
	чч:мм	°С	%	°С	%	Па	л/с	м ³ /ч	м/с	м/с	А
1	06:00	+24	63	+12,8	95	126	0,38	1275	1,48	1,97	0,52
2	08:00	+25	57	+13,7	95	126	0,38	1275	1,48	1,97	0,52
3	10:00	+26	52	+13,7	95	126	0,38	1275	1,48	1,97	0,52
4	12:00	+27	47	+13,7	95	118	0,43	1700	1,97	2,62	0,78
5	14:00	+27	47	+13,7	95	118	0,43	1700	1,97	2,62	0,78
6	16:00	+27	47	+13,7	95	118	0,43	1700	1,97	2,62	0,78
7	18:00	+26	52	+13,7	95	118	0,43	1700	1,97	2,62	0,78
8	20:00	+25	57	+12,8	96	126	0,43	1275	1,48	1,97	0,52
9	22:00	+23	69	+12,5	96	125	0,43	1275	1,48	1,97	0,52
10	00:00	+20	91	+13,0	97	125	0,43	1275	1,48	1,97	0,52

Измерения проводились в фанкойле с расходом воздуха от 850 до 1700 м³/ч каждые два часа в течение суток (табл. 1)..

На основании результатов эксперимента проведем необходимые расчеты.

1. По температуре и относительной влажности воздуха на входе и выходе из вентилятора определяем плотность воздуха $\rho_{в,вх}$ и $\rho_{в,вых}$ при атмосферном давлении 101 325 Па (табл. 2), а также по средним параметрам ($T_{в,вх} = 19^\circ\text{C}$ и $\phi_{нар}^{вх} = 76,8\%$) теплоемкость воздуха $C_{p,в}$ рассчитываем по формуле:

$$C_{p,в} = 1,005 + 1,8d / 1000, \quad (8)$$

где 1,005 и 1,8 кДж/кг·К – теплоемкости сухого воздуха и водяного пара соответственно, $d = 10,54$ г/кг – влагосодержание воздуха при средних параметрах.

$$C_{p,в} = 1,005 + 1,8 \times \frac{10,54}{1000} = 1,024 \text{ кДж/кг·К.} \quad (9)$$

2. По формуле (5) определяем массовый расход воздуха на входе и выходе из фанкойла (результаты приведены в табл. 2). В случае несовпадения этих величин, для дальнейших вычислений берем среднее значение.
3. По разности давлений жидкости на входе и выходе определяем потерю давления (табл. 2) как:

$$\Delta p = \rho_{ж,вх} - \rho_{ж,вых}. \quad (10)$$

По средним параметрам воды ($T_{ж,ср} = 9,5^\circ\text{C}$, $\rho_{ж,ср} = 136,3$ Па) определяем величину удельной объемной теплоемкости при этих условиях:

$$C_{ж} = 4190,8 \text{ кДж/(м}^3\cdot\text{K)}. \quad (11)$$

4. По формулам (1)–(3) рассчитываем производство энтропии вследствие неидеальности теплообмена в фанкойле (в табл. 3). На рис. 2 представлена гистограмма потерь энергии от неидеальности



Рис. 2. Потери энергии вследствие неидеальности теплообмена.

Fig. 2. Energy losses due to non-ideal heat transfer.

Таблица 2. Результаты измерений параметров воздуха в фанкойле

Table 2. Results of measurements of air parameters in a fan coil unit

№ замера	Время замера	Плотность воздуха $\rho_{в, вх}$	Плотность воздуха $\rho_{в, вых}$	Расход воздуха $G_{в, вх}$	Расход воздуха $G_{в, вых}$	Расход воздуха средний $G_{в}$	Потеря давления Δp	Мощность вентилятора, $N_{вент}$
	чч:мм	кг/м ³	кг/м ³	кг/с	кг/с	кг/с	Па	Вт
1	06:00	1,18	1,23	0,419	0,436	0,428	24	114,4
2	08:00	1,18	1,22	0,419	0,433	0,426	24	114,4
3	10:00	1,17	1,22	0,416	0,433	0,425	24	114,4
4	12:00	1,17	1,22	0,553	0,575	0,564	32	171,6
5	14:00	1,17	1,22	0,553	0,575	0,564	32	171,6
6	16:00	1,17	1,22	0,553	0,575	0,564	32	171,6
7	18:00	1,17	1,22	0,553	0,575	0,564	32	171,6
8	20:00	1,18	1,23	0,419	0,436	0,428	24	114,4
9	22:00	1,18	1,23	0,419	0,436	0,428	25	114,4
10	00:00	1,19	1,23	0,423	0,436	0,430	25	114,4

теплообмена в зависимости от номера измерения.

- По формуле (6) определяем мощность, потребляемую вентилятором (результаты представлены в табл. 2), а по выражению (4) – производство энтропии в вентиляторе вследствие гидравлических потерь (табл. 4), температуру окружающей среды принимаем как среднюю входных и выходных температур воздуха (табл. 3).

На рис. 3 приведена величина потерь в вентиляторе для каждого измерения.

- По формуле (7) рассчитываем производство энтропии вследствие гидравлических сопротивлений жидкости при прохождении жидкостного теплообменника в фанкойле (табл. 2) и строим гистограмму в зависимости от номера измерения (рис. 4). КПД

насоса задаем, исходя из принятого прототипа гидромодуля АкваВЕНС 2.0 КН-Р4-1Н и насоса в этом гидромодуле: Ebara DWC-V 500/2.2 (КПД равен 0,862 при 100% загрузке).

- Результаты расчета производства энтропии в фанкойле представлены в табл. 4.

Таким образом, создана методика определения потерь в фанкойлах с помощью энтропийного метода, которая позволила определить составляющие потерь в фанкойле и их вклад в суммарные потери.

ВЫВОДЫ

- Анализ полученных результатов показывает, что потери, связанные с неидеальностью теплообмена в фанкойле в 10 раз выше, чем гидравлические

Таблица 3. Результаты измерений температур в фанкойле

Table 3. Results of temperature measurements in the fan coil unit

Номер замера	Время замера	Температура окружающей среды T_{oc}	Температура окружающей среды T_{oc}
№	чч:мм	°C	K
1	06:00	+18,4	291,5
2	08:00	+19,4	292,5
3	10:00	+19,9	293,0
4	12:00	+20,4	293,5
5	14:00	+20,4	293,5
6	16:00	+20,4	293,5
7	18:00	+19,9	293,0
8	20:00	+18,9	292,0
9	22:00	+17,8	290,9
10	00:00	+16,5	289,6

Таблица 4. Производство энтропии в фанкойле

Table 4. Entropy production in a fan coil unit

Номер замера	Время замера	$\Delta S_{то}$	$\Delta S_{вент}$	$\Delta S_{насос}$
№	чч:мм	Вт/К	Вт/К	Вт/К
1	06:00	11,34	0,390	3,630E-05
2	08:00	11,32	0,388	3,617E-05
3	10:00	9,90	0,388	3,611E-05
4	12:00	5,70	0,578	5,439E-05
5	14:00	5,70	0,578	5,439E-05
6	16:00	5,70	0,578	5,439E-05
7	18:00	7,63	0,579	5,448E-05
8	20:00	9,86	0,389	3,623E-05
9	22:00	12,35	0,390	3,789E-05
10	00:00	17,53	0,392	3,806E-05



Рис. 3. Величина потерь энергии в вентиляторе.

Fig. 3. Energy loss in the fan.

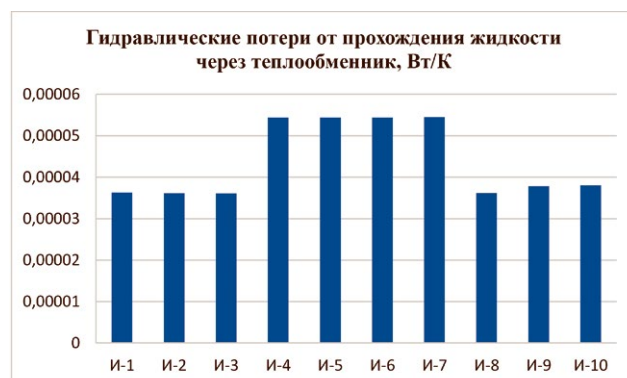


Рис. 4. Гидравлические потери от прохождения жидкости через теплообменник.

Fig. 4. Hydraulic losses from the passage of liquid through the heat exchanger.

потери при прохождении воздуха и охлаждающей жидкости через фанкойл.

- Основным направлением для снижения потерь должно быть повышение эффективности процесса теплообмена, которое может быть достигнуто за счет увеличения площади теплообмена, и как следствие, снижения перепада температур.
- Гидравлические потери от движения воздуха и жидкости составляют не более 10% от общего энергопотребления, и хотя вносят свой вклад в потребляемые мощности вентилятора в фанкойле и насоса в гидромодуле, несколько увеличивая их, но в то же время незначительно влияют на общее энергопотребление.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Финансирование. Статья не имеет спонсорской поддержки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Архаров А.М. Основы криологии. Энтропийно-статистический анализ низкотемпературных систем. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 507 с.
- Шишов В.В., Талызин М.С. Практическое применение энтропийно-статистического метода анализа холодильных циклов // Холодильная техника. 2015. № 3. С. 25–30.
- Архаров А.М., Шишов В.В., Талызин М.С. Энтропийно-статистический анализ низкотемпературных холодильных циклов и выбор на его основе оптимальной системы холодоснабжения магазина // Холодильная техника. 2016. № 3. С. 30–34.
- Здобнов М.И., Лавров Н.А., Шишов В.В. Анализ потерь в теплообменнике теплоутилизаторе с помощью энтропийно-статистического метода // Холодильная техника. 2019. № 2. С. 37–40.
- Здобнов М.И., Лавров Н.А., Шишов В.В., Каракулов С.И. Анализ потерь в испарительно конденсаторном контуре центрального кондиционера с помощью энтропийно-статистического метода // Холодильная техника. 2019. № 8. С. 28–33.

REFERENCES

- Arharov AM. Osnovy kriologii. *Jentropijno-statisticheskij analiz nizkotemperaturnyh sistem*. Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Bauman, 2014, 507 p. (in Russ.).
- Shishov VV, Talyzin MS. Prakticheskoe primenenie jentropijno-statisticheskogo metoda analiza holodil'nyh ciklov. *Refrigeration Technology*. 2015;104(3):25–30. (in Russ.). doi: 10.17816/RF98878
- Arharov AM, Shishov VV, Talyzin MS. Jentropijno-statisticheskij analiz nizkotemperaturnyh holodil'nyh ciklov i izbor na ego osnove optimal'noj sistemy holodosnabzhenija magazina. *Refrigeration Technology*. 2016;105(3):30–34. (in Russ.). doi: 10.17816/RF99047
- Zdobnov MI, Lavrov NA, Shishov VV. Analiz poter' v teploobmennike teploutilizatore s pomoshh'ju jentropijno-statisticheskogo metoda. *Refrigeration Technology*. 2019;108(2):37–40. (in Russ.). doi: 10.17816/RF99501
- Zdobnov MI, Lavrov NA, Shishov VV, Karakulov SI. Analiz poter' v isparitel'no kondensatornom konture central'nogo kondicionera

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с подготовкой и публикацией статьи.

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

ADDITIONAL INFORMATION

Competing interests. The author declares no any transparent and potential conflict of interests in relation to this article publication.

Funding source. Article is not sponsored.

Contribution of authors. All authors made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication.

ного кондиционера с помощью энтропийно-статистического метода // Холодильная техника. 2019. № 8. С. 28–33.

- Здобнов М.И., Лавров Н.А. Анализ потерь в вентиляционных установках с помощью энтропийно-статистического метода // Холодильная техника. 2018. № 8. С. 36–41.

- Тищенко И.В., Абалакин С.А., Меркулов В.И., Жаров А.А. Энтропийно-статистический анализ системы кондиционирования воздуха пассажирского самолета // Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения: материалы Третьей междунар. науч.-практ. конф. 2020. С. 318–326.

- Архаров А.М., Архаров И.А., Сычев В.В., Батенин В.М., Клименко А.В. О результатах энтропийного и эксергетического анализа процесса смешения частей идеального газа разной температуры // Холодильная техника. 2014. № 7. С. 35–39.

- Белова Е.М. Системы кондиционирования с чиллерами и фанкойлами. М.: Изд-во Евроклимат, 2003. 400 с.

s pomoshh'ju jentropijno-statisticheskogo metoda. *Refrigeration Technology*. 2019;108(8):28–33. (in Russ.). doi: 10.17816/RF104152

- Zdobnov MI, Lavrov NA. Analiz poter' v ventiljacionnyh ustanovkah s pomoshh'ju jentropijno-statisticheskogo metoda. *Refrigeration Technology*. 2018;107(8):36–41. (in Russ.). doi: 10.17816/RF99432

- Tishhenko IV, Abalakin SA, Merkulov VI, et al. Jentropijno-statisticheskij analiz sistemy kondicionirovanija vozduha passazhirskogo samoleta. *Holodil'naja i kriogennaja tehnika, sistemy kondicionirovanija i zhizneobespechenija: materialy Tret'ej mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii*. 2020, p. 318–326. (in Russ.).

- Arharov AM, Arharov IA, Sychov VV, et al. O rezul'tatah jentropijnogo i jeksergeticheskogo analiza processa smeshenija chastej ideal'nogo gaza raznoj temperatury // *Refrigeration Technology*. 2014;103(7):35–39. (in Russ.). doi: 10.17816/RF98779

- Belova EM. *Sistemy kondicionirovanija s chillerami i fjenkojlami*. Moscow: Izd-vo Evroklimat, 2003, 400 p. (in Russ.).

ОБ АВТОРАХ

Осипенко Валентина Владимировна, инженер;
e-mail: region@veza.ru

***Лавров Николай Алексеевич**, д-р техн. наук, профессор;
адрес: 105005, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, Москва, Россия;
eLibrary SPIN: 9187-7444;
e-mail: 79035596471@yandex.ru

***Автор для переписки**

AUTHOR'S INFO

Valentin V. Osipenko, Engineer;
e-mail: region@veza.ru

***Nikolai A. Lavrov**, Dr. Sci. (Tech.), Professor;
address: 5, 2-nd Baumanskaya, Moscow, 105005, Russia;
eLibrary SPIN: 9187-7444;
e-mail: 79035596471@yandex.ru

***Corresponding author**