

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДОБАВОЧНЫХ ПОТЕРЬ СУДОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА

*А.В. Гринек, кандидат технических наук, доцент*

*И.П. Бойчук, кандидат технических наук, доцент*

*Д.В. Тиняков, кандидат технических наук, доцент*

*Н.Ф. Марченко, старший преподаватель*

*С.Ю. Алексянц, аспирант*

*Е.М. Слонов, курсант*

В статье рассмотрен способ повышения эффективности работы судовых трансформаторов на основе системы контроля температурного режима. В процессе изменения напряжения в судовой системе часто возникают тепловые потери меди в железном сердечнике и катушке, то есть перегрузка вызывает чрезмерный нагрев и может повлиять на работу трансформатора. Приведен расчет тепловых параметров трансформатора. Показана математическая модель в Matlab. В статье предложена функциональная схема устройства контроля потерь. Система контроля следит за температурой внутри трансформатора при работе в условиях перегрузки. Показано, что установка устройства позволит улучшить работу трансформатора и сохранит срок его службы.

**Ключевые слова:** трансформатор, температура, система контроля

## DEVICE FOR MONITORING ADDITIONAL LOSSES OF A SHIP TRANSFORMER BASED ON A TEMPERATURE MODEL

*A.V. Grinek, I.P. Boichuk, D.V. Tinyakov, N.F. Marchenko, S.Y. Aleksyants, E.M. Slonov*

The article considers a way to improve the efficiency of ship transformers. A temperature control system is used. In the process of changing the voltage in the ship's system, thermal losses of copper in the iron core and coil usually often occur. Thus, overloading will cause excessive heating and may affect the operation of the transformer. The calculation of the thermal parameters of the transformer is given. The mathematical model in Matlab is shown. The article proposes a functional diagram of the device. The control system monitors the temperature inside the transformer when operating under overload conditions. It is shown that the installation of the device will improve the performance of the transformer and save its service life.

**Key words:** transformer, temperature, control system

### Введение

Качество судовой электроэнергетики определяет надежность и эффективность всех элементов судовой электроэнергетической системы. Трансформаторы являются важнейшими элементами в сети передачи и преобразования электрической энергии. В случае потери питания на судне будет нарушена работа системы главного судового освещения, некоторых систем навигационного оборудования, системы водоснабжения судна. Данная ситуация приведёт к задержке судна на время ремонта, а также к грубому нарушению техники безопасности при проведении погрузки в тёмное время суток, работе в грузовых трюмах, мастерской и так далее [1,2]. Большие затраты потребуются при выходе трансформаторов из строя, так как это приводит к потере прибыли от перевозки грузов. Существуют следующие способы повышения эффективности работы трансформаторов: установка системы охлаждения на трансформатор; установка помехоподавляющего устройства; установка устройства контроля добавочных потерь с оценкой качества электроэнергии; установка устройства контроля добавочных потерь без оценки качества электроэнергии.

### Методы и материалы

Одним из наиболее важных параметров, влияющих на изоляцию трансформатора, является температура [3-5]. В немагнитном трансформаторе температура имеет большее значение, поскольку вся охлаждающая среда представляет собой воздух. Для решения поставленных целей – улучшения работы судового трансформатора, были решены следующие задачи: на основе анализа существующих, методов контроля и управления трансформаторами [6-10] и патентных решений [11-12] описана система контроля температурного режима и проведено моделирование системы. Объект исследования – трансформатор переменного тока ТСЗМ 6,3 – трёхфазный, каплезащищенный, сухой предназначенный для судов и плавсооружений. Трансформатор предназначен для питания судового оборудования, освещения, систем контроля, навигации и пожаротушения. Данный трансформатор соответствует требованиям в области судового электрооборудования и устанавливается на судах неограниченного района плавания. Основные сведения о трансформаторе приведены в таблице 1.

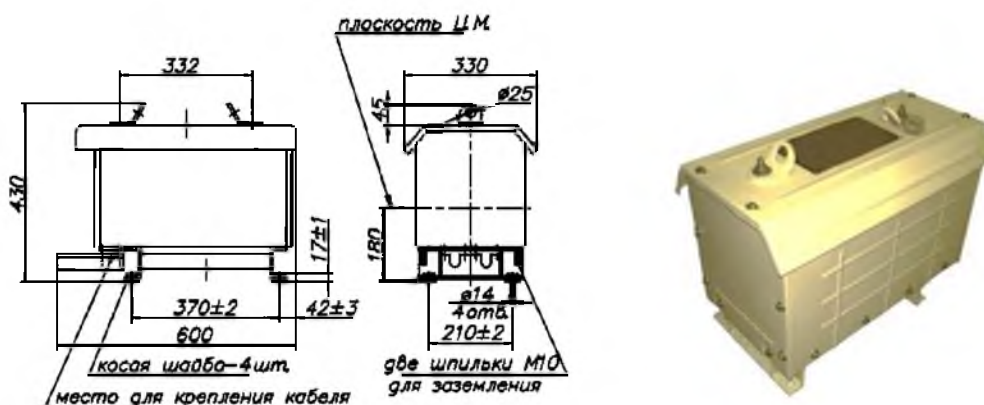


Рисунок 1 – Общий вид трансформатора ТСЗМ 6,3

В таблице 1 приведены основные характеристики трансформатора.

Таблица 1– Основные сведения о трансформаторе

Название трансформатора	ТСЗМ 63
Стандарт	267EN60076-1
Номинальная мощность	63 кВА=56,7кВт
Ток нагрузки	240 А
Класс изоляции	F
Тип	Сухой
Напряжение обмоток, В	400/230
Масса, кг	352
Класс защиты	IP 23

Введение системы контроля добавочных потерь без оценки качества электроэнергии позволит сохранить срок службы трансформатора, основываясь только на данных ихмерний температурных режимов работы трасформатора [12]. Если изменение температуры в тепловой модели выше допустимого, то устройство начинает отключать потребителей электроэнергии. Таким образом, установка устройства контроля добавочных потерь позволит улучшить работу трансформатора и сохранит его срок службы без дополнительных измерений.

Для контроля температуры и регулирования нагрузки рассчитаны тепловые режимы работы трансформатора. На рис. 2 приведена общая схема устройства контроля добавочных потерь. Устройство содержит: датчики температуры воздуха (ДТВ) в наиболее нагретой точке трансформатора, датчик тока (ДТ), датчик температуры трасформатора (ДТТ), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), блок расчета и анализа оперативных параметров (БРАОП), блок расчета изменившихся параметров (БРИП), база данных (БД), блок управления нагрузкой (БУН), блок аварийно-

предупредительной сигнализации (АПС). Датчики снимают показания с трансформатора и окружающей среды. АЦП, БРАОП, БРИП, БД – преобразуют и обрабатывают полученную информацию. АПС сигнализирует о превышении температурного режима, БУ управляет нагрузкой на трансформатор при неудовлетворительном тепловом режиме. Показатель температуры – показания ожидаемой температуры наиболее нагретой точки, а также уровень изменения температуры.

Датчики ДТВ, ДТТ, ДТ – это устройства, преобразующие измеряемые величины в электрический сигнал, для последующей передачи в АЦП, а именно термоэлектрический датчик ДТВ – температуру окружающего воздуха, термоэлектрический датчик ДТТ - температуру трансформатора, индукционный датчик ДТ - мгновенные значения тока. Блок БРИП – это контроллер, организующий математический модуль для осуществления расчета эквивалентного значения коэффициента нагрузки, действующего значения нагрузочных токов, средних значений температур. Блок БД – база данных, необходимая для расчёта и анализа работы трансформатора. Блок БРАОП представляет собой контролер, который производит расчет температур для предельно допустимых значений коэффициента нагрузки трансформатора. Блок АПС – аварийно-предупредительная сигнализация, предназначена для мониторинга трансформатора, или же данный блок можно интегрировать в уже установленную судовую систему АПС. Блок БУН – блок управления нагрузкой, формирующий сигналы управления нагрузкой. Блоки устройства связаны между собой шинами передачи информации.

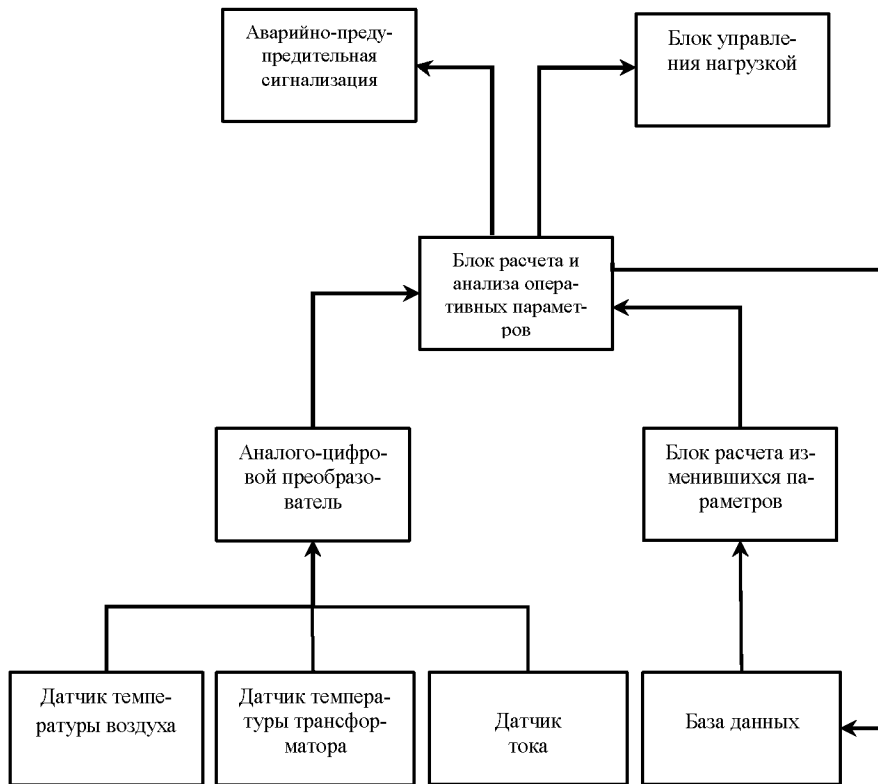


Рисунок 2 – Общая схема устройства контроля добавочных потерь

Работа устройства заключается в том, что датчики температуры окружающей среды и датчик тока нагрузки с помощью аналого-цифрового преобразователя преобразуют начальные величины в данные, такие как  $\theta_a$ ,  $\theta_{HS}$  и  $I_n$  соответственно, для последующего их преобразования и анализа в блоке расчёта и анализа оперативных параметров. Из блока БРАОП найденные значения поступают в блок базы данных БД, далее в блоке расчёта изменившихся параметров полученные значения пересчитываются с учётом новых данных из БД. Контроллер БРАОП преобразовывает новые полученные данные из АЦП и БРИП анализирует их и отправляет в блок АПС. В случае превышения допустимых значений, БРАОП отправляет сигналы в блок управления нагрузкой БУН и в АПС, которая включает сигнализацию. Помимо этого, АПС позволяет контролировать работу трансформатора, если предусмотрена такая возможность системой, с помощью вывода данных на монитор или информационное табло.

### Результаты и обсуждение

#### Принцип работы схемы устройства.

Данные с датчиков температур и тока после преобразования в блоке АЦП рассчитываются по формулам расчёта изменения допустимой температуры под нагрузкой в блоке БРАОП. Для нахождения среднего роста температуры обмотки воспользуемся формулой (1):

$$\Delta\theta_{HSr} = Z \cdot ((\Delta\theta_{HSn} \cdot I_r) - \theta_a) \cdot I_r^q \quad (1)$$

где  $Z$  – коэффициент, равный 1.25;

$q$  – коэффициент, равный 1.6;

$I_r$  – коэффициент нагрузки, определяется по  $\frac{I_r}{I_n}$  из данных АЦП и БД;

$\theta_a$  – температура окружающей среды из данных АЦП;

$\Delta\theta_{HSn}$  – номинальный рост температуры обмотки при номинальной нагрузке.

Далее производится сравнение значений  $\Delta\theta_{HSr}$  и  $\Delta\theta_{HSn}$ , где должно соблюдаться условие  $\Delta\theta_{HSr} \leq \Delta\theta_{HSn}$ , в противном случае сработает система безопасности и БУН. Последний ограничит нагрузку для соблюдения данного условия и сохранит коэффициент старения трансформатора на номинальном уровне.

Блок данных сохраняет значения, полученные в БРАОП, которые, в свою очередь, вместе с постоянными величинами из БД, передаются в БРИП для дальнейшего расчёта.

Изменения значений, из-за изменившейся нагрузки трансформатора, определяются с помощью формулы (2):

$$\Delta\theta_{HS} = (\Delta\theta_{wr} + \Delta\theta_{wr} \cdot \frac{I_r}{I_{r1}}) \cdot I_{r1}^q \quad (2)$$

$I_1$  – изменившийся коэффициент нагрузки определяется по  $\frac{I_1}{I_n}$ ,

$\theta_a$  – температура окружающей среды из данных АЦП;

$\Delta\theta_{wr}$  – согласно данным из БРАОП.

Далее производится сравнение значений  $\Delta\theta_{HS}$  и  $\Delta\theta_{HSn}$ , где должно соблюдаться условие  $\Delta\theta_{HS} \leq \Delta\theta_{HSn}$ , в противном случае сработает система безопасности и БУ ограничит нагрузку для соблюдения данного условия и сохранит коэффициент старения трансформатора на номинальном уровне. Дополнительно в каждом блоке производится расчёт будущей конечной температуры трансформатора в установившемся тепловом режиме с помощью датчика температуры наиболее нагретой точки по формуле:

$$\theta_{HSk} = \theta_{HSдат} + \Delta\theta_{HS} \quad (3)$$

**Модель работы устройства контроля добавочных потерь.** Моделирование устройства проводилось в программе MatLab, в среде моделирования Simulink (рис. 3). Устройство считывает показания с датчиков и обрабатывает их в блоках БРАОП и БРИП. Подсистемы БРАОП и БРИП, представленные на рис. 4 и рис. 5, представляют собой математические вычисления и логические сравнения. Последние определяют

режим работы трансформатора. В случае неудовлетворительного теплового режима, полученного в блоках, модуль управления ограничивает нагрузку на трансформатор.

Если установился неудовлетворительный тепловой режим трансформатора, то устройство подаёт питание на 1-ю группу контакторов, которые отключают нагрузку. 2-я группа контакторов, подключённая сверху устройства, обесточивает дополнительных потребителей, если первоначальное отключение не повлияло на температурный режим. Питание с контакторов пропадёт, когда установится положительный температурный режим трансформатора, не противоречащий заданным уставкам в устройстве. Помимо управления контакторами, устройство контроля добавочных потерь подаёт сигнал в судовую систему АПС для оповещения экипажа и принятия мер, направленных на понижение температуры трансформатора и уменьшение подключённой нагрузки. Датчики ДТТ, ДТВ, ДТ подают сигналы для работы устройств.

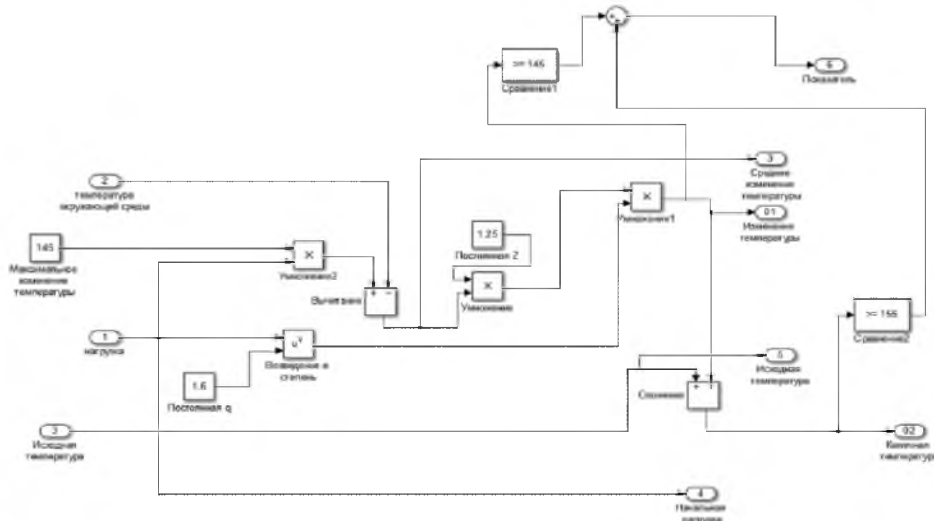


Рисунок 3 - Схема работы устройства контроля добавочных потерь в Matlab

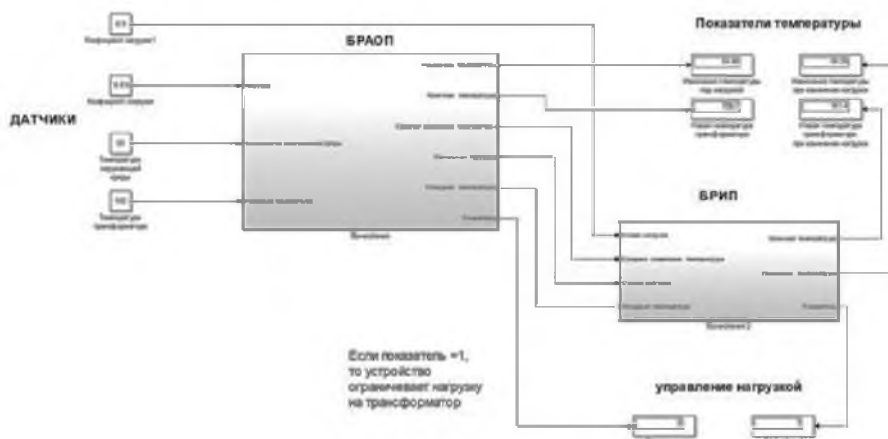


Рисунок 4 - Подсистема блока расчёта, преобразования и анализа данных с датчиков

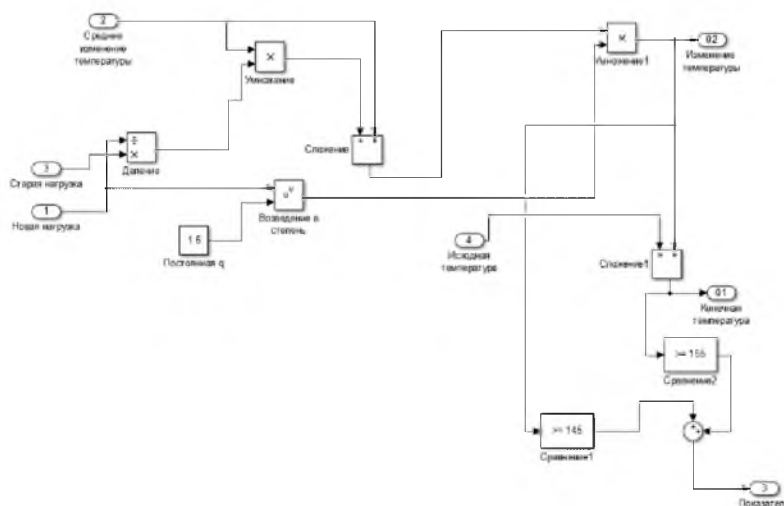


Рисунок 5 - Подсистема блока расчета и анализа данных

**Аппаратная реализация устройства на микроконтроллере Arduino MEGA 2560.** Главным элементом системы является программируемый микроконтроллер – Arduino MEGA 2560, это микросхема, имеющая 54 цифровых входа/выхода, 16 аналоговых входов, кварцевый осциллятор 16 МГц, 8 КБ памяти, соединение USB, разъём ICSP, 4 КБ памяти, не

стираемой при выключении, а также 256 КБ Flash памяти. Исходя из того, что микроконтроллер MEGA2560 включает в себя АЦП, блоки БРАОП и БРИП, а также может выполнять функцию базы данных, общая схема устройства со всеми элементами может выглядеть так, как изображено на рис. 6.

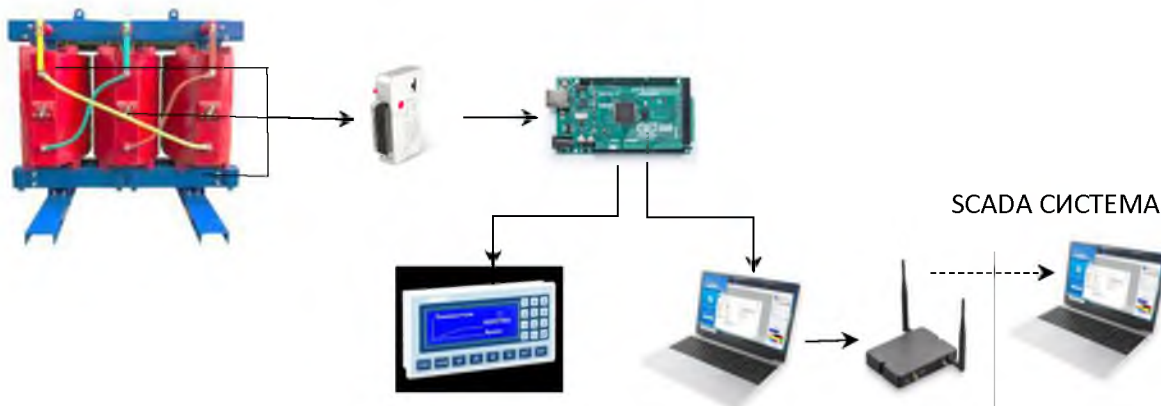


Рисунок 6 - Функциональная схема устройства

Основными компонентами системы являются датчики температуры, блок ввода-вывода сигналов, контроллер, панель сигнализации оператора, компьютер. Также при наличии связи данный процесс измерений может быть выведен через роутер в SCADA-систему.

**Заключение.** В данной статье представлена схема и показан принцип устройства для контроля температуры трансформатора. Рассчитаны показатели среднего роста температуры трансформатора. Показаны основные элементы системы. Данное устройство позволяет оценивать добавочные потери, по которым рассчитывает ожидаемый температурный режим и предупреждает перегрев,

вызывающий ускоренное старение изоляции, и как результат, уменьшение срока эксплуатации, а также возможный аварийный выход из строя трансформатора. Устройство, помимо оценки добавочных потерь и температурного режима, может сигнализировать о тепловой перегрузке и ограничивать основную электрическую нагрузку. Результатом модернизации является защита трансформатора от выхода из строя, сохранение срока эксплуатации при перегрузках или более высокой температуре машинного отделения. Помимо этого, данную модернизацию можно применять на других судах, с похожим расположением трансформаторов.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что модернизация судовых трансформаторов путём установки устройства контроля добавочных потерь необходима для повышения безопасности и обеспечения безотказной работы.

#### Литература

1. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XI Электрическое оборудование. – Санкт-Петербург, 2019. – 225с.
2. РД 31.21.30-97. Правила технической эксплуатации судовых технических средств и комплексов. – ЦНИИМФ, 1997. – 369 с.
3. Kashyap M. Temperature control in transformer using intelligent system / M. Kashyap, S. Kansal // 2nd International Conference on Recent Advances in Engineering & Computational Sciences (RAECS). – 2015.
4. Chandra S.H. Temperature control of transformers using soft computing techniques / S.H. Chandra, Satyanarayana // International Journal of Computer Engineering and Technology. – 2012. - №2. – pp. 133-137.
5. Yang W. On-line temperature measurements with infrared technology on high voltage device / W. Yang, X.H. Wang, M.Z. Rong, S.L. Jia // Proceedings of the CSEE. – 2002. - pp. 113-117.
6. Ali Shah S.F. Voltage Control and Power Loss Reduction in an Active Distribution Network using Solid State Transformers / S.F. Ali Shah, M.I. Ali Sajjad, H. Farooq, M.F. Nadeem Khan // Sir Syed University Research Journal of Engineering & Technology. – 2020. – vol. 9, № 2.
7. Hotra O. Selected Issues on Temperature Sensors / O. Hotra // Lublin University of Technology. – 2013.
8. Jia D. The transformer winding temperature monitoring system based on fiber bragg grating / D. Jia, Z. Yao, C. Li // International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems. – 2015. - vol. 8, № 1. – pp. 538-560.
9. Jian-qin F. Present Research Situation and Trend of Temperature Measurement and Control Technology for Dry-type Transformers / F. Jian-qin, K. Guo-ping, C. Zhi-wu, Z. An-ping, W. Yun-bing, C. Guang-zhao // Procedia Environmental Sciences. – 2011. - vol. 11, part A. – pp. 398-405.
10. He Q. Prediction of top-oil temperature for transformers using neural networks / Q. He, J. Si, D.J. Tylavsky // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2000. - vol. 15 issue 4. - pp. 1205 – 1211.

11. Пат. №131198 (РФ). Устройство контроля добавочных потерь электроэнергии в трансформаторах / В.В. Супиков, А.А. Зябкин, 2012.
12. Пат. №2051466 (РФ). Помехоподавляющее устройство / В.А. Базанов, Ф.В. Черепенин, В.Е. Гальперин, 1995.

#### References

1. Rossijskij morskij registr sudohodstva. Pravila klassifikacii i postrojki morskikh sudov. Chast' XI Jelektricheskoe oborudovanie. – Sankt-Peterburg, 2019. – 225s.
2. RD 31.21.30-97. Pravila tehnicheckoj jekspluatacii sudovyh tehnicheckih sredstv i kompleksov. – CNIIMF, 1997. – 369 s.
3. Pat. №2051466 (RF). Pomehopodavljajushhee ustrojstvo / V.A. Bazanov, F.V. Cherepenin, V.E. Gal'perin, 1995. Ali Shah S.F. Voltage Control and Power Loss Reduction in an Active Distribution Network using Solid State Transformers / S.F. Ali Shah, M.I. Ali Sajjad, H. Farooq, M.F. Nadeem Khan // Sir Syed University Research Journal of Engineering & Technology. – 2020. – vol. 9, № 2.
4. Kashyap M. Temperature control in transformer using intelligent system / M. Kashyap, S. Kansal // 2nd International Conference on Recent Advances in Engineering & Computational Sciences (RAECS). – 2015.
5. Chandra S.H. Temperature control of transformers using soft computing techniques / S.H. Chandra, Satyanarayana // International Journal of Computer Engineering and Technology. – 2012. - №2. – pp. 133-137.
6. Yang W. On-line temperature measurements with infrared technology on high voltage device / W. Yang, X.H. Wang, M.Z. Rong, S.L. Jia // Proceedings of the CSEE. – 2002. - pp. 113-117.
7. Hotra O. Selected Issues on Temperature Sensors / O. Hotra // Lublin University of Technology. – 2013.
8. Jia D. The transformer winding temperature monitoring system based on fiber bragg grating / D. Jia, Z. Yao, C. Li // International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems. – 2015. – vol. 8, № 1. – pp. 538-560.
9. Jian-qin F. Present Research Situation and Trend of Temperature Measurement and Control Technology for Dry-type Transformers / F. Jian-qin, K. Guo-ping, C. Zhi-wu, Z. An-ping, W. Yun-bing, C. Guang-zhao // Procedia Environmental Sciences. – 2011. – vol. 11, part A. – pp. 398-405.
10. He Q. Prediction of top-oil temperature for transformers using neural networks / Q. He, J. Si, D.J. Tylavsky // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2000. – vol. 15 issue 4. – pp. 1205 – 1211.