

# МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

УДК 621.314.21:681.518.5

DOI: 10.18503/2311-8318-2016-3(32)-39-43

Стеклов А.С.

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

## НЕЙРОНЕЧЁТКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТЕПЕНИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Актуальной является задача разработки систем прогнозирования технического состояния трансформаторов судовых электроэнергетических установок. Одним из путей решения задачи является применение искусственных нейронных сетей. Впервые предложен комплексный подход к определению степени работоспособности трансформаторов судовых электроэнергетических установок на основе искусственных нейронных сетей. Полученные результаты могут быть основой для создания новой системы прогнозирования технического состояния трансформаторов судовых электроэнергетических установок.

**Ключевые слова:** нейронечёткая сеть, трансформатор, электроэнергетическая установка, диагностика, степень работоспособности.

### ВВЕДЕНИЕ

Безопасная эксплуатация судна в значительной степени определяется уровнем надежности электрооборудования силовой электроэнергетической установки. Поэтому представляется целесообразным оценить степень работоспособности и спрогнозировать дальнейшую эксплуатацию трансформаторов судовых электроэнергетических комплексов, от уровня технического состояния которого зависит работоспособность электроэнергетической установки в целом [1-5].

Для определения технического состояния трансформатора применение аппарата нечёткой логики позволяет работать с существующей неопределенностью, неполнотой и нечеткостью информации. Выбор решения по числовой информации в условиях неопределенности (риска) возникает в том случае, когда с каждым принимаемым решением связано некоторое множество возможных результатов с известными условными вероятностями.

### МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТЕПЕНИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Для реализации процесса нейронечёткого моделирования степени работоспособности трансформаторов судовых электроэнергетических установок предлагается использовать библиотеку нечеткой логики (Fuzzy Logic Toolbox) из пакета MatLab.

Параметры, используемые для контроля работоспособности: токи в фазах ( $I_1$ ) первичной и вторичной обмоток, напряжение по фазам ( $U_2$ ) первичной и вторичной обмоток, сопротивление изоляции на корпус ( $R_{iz}$ ), температура первичной и вторичной обмоток ( $t_{перв}$  и  $t_{втор}$ ) [6].

Для обеспечения регистрации диагностических параметров в трансформаторе на каждую обмотку устанавливаются датчики: датчик температуры Pt-100 в каждую фазу, датчики тока, напряжения и сопротивления изоляции в каждую фазу.

Моделирование степени работоспособности трансформатора осуществим отдельно для электрической и

неэлектрической частей.

Нечеткий логический вывод можно осуществить в несколько этапов [7]:

1) этап фаззификации: определение принадлежности объекта к нечеткому множеству;

2) этап композиции: на данном этапе определяется уровень принадлежности объекта ко всему нечеткому правилу;

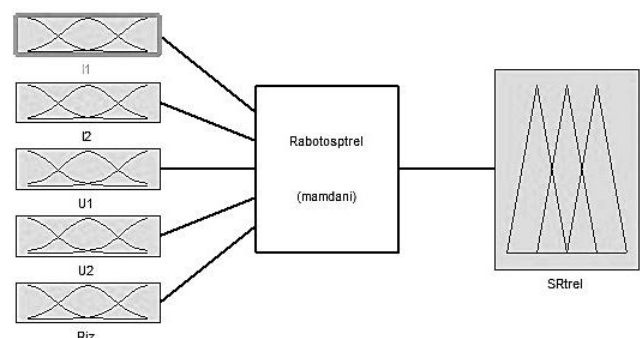
3) этап импликации: это оценка вывода нечеткой системы в соответствии с данным правилом в зависимости от уровня принадлежности объекта правилу и значения правила;

4) этап агрегации: объединение результатов импликации для каждого правила в единое нечеткое множество решений;

5) этап дефаззификации: установка в соответствие нечеткому значению числового эквивалента.

Для определения степени работоспособности электрической части трансформатора входными переменными являются сопротивление изоляции ( $R_{iz}$ ), токи в фазах ( $I_1$ ,  $I_2$ ) первичной и вторичной обмоток, напряжение по фазам ( $U_1$ ,  $U_2$ ) первичной и вторичной обмоток трансформатора. Выходом является степень работоспособности электрической части трансформатора [8].

На рис. 1 представлена структурная схема определения степени работоспособности электрической части трансформатора.



**Рис. 1. Структурная схема определения работоспособности электрической части трансформатора**

На **рис. 1** входные переменные:  $I_1$  - токи в фазах первичной обмотки,  $I_2$  - токи в фазах вторичной обмотки,  $U_1$  - напряжения в фазах первичной обмотки,  $U_2$  - напряжения в фазах вторичной обмотки,  $R_{iz}$  - сопротивление изоляции, выходная переменная:  $SR_{trel}$  - степень работоспособности электрической части трансформатора,  $Rabotosp_{trel}$  (mamdani) - нечеткая система Мамдани-Заде.

Для определения степени работоспособности неэлектрической части трансформатора входными переменными являются два параметра: температура первичной обмотки ( $tperv$ ) и температура вторичной обмотки ( $tvor$ ), выходом является степень работоспособности неэлектрической части трансформатора. На **рис. 2** представлена структурная схема определения степени работоспособности неэлектрической части трансформатора.

На **рис. 2** входные переменные:  $tperv$  - температура первичной обмотки,  $tvor$  - температура вторичной обмотки, выходная переменная:  $SR_{trneel}$  - степень работоспособности неэлектрической части трансформатора,  $Rabotosp_{trneel}$  (mamdani) - нечеткая система Мамдани-Заде.

#### ЭТАПЫ НЕЙРОНЕЧЕТКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

##### Фазификация входных параметров

На данном этапе происходит преобразование вектора значений входных переменных  $X$  в вектор нечетких множеств  $X^1$ , необходимых в дальнейшем для выполнения нечеткого логического вывода.

Лингвистическую оценку значения переменных  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $tperv$  и  $tvor$  будем производить с помощью пяти термов: {«Очень низкое», «Ниже нормы», «Норма», «Выше нормы», «Очень высокое»}, а переменной  $R_{iz}$  - с помощью трёх {«Очень низкое», «Ниже нормы», «Норма»}.

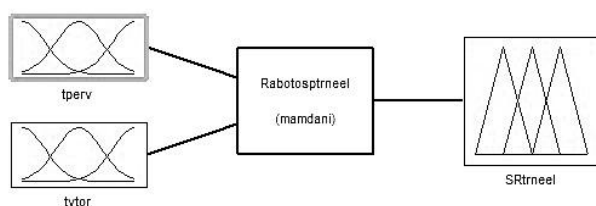
Выходные переменные «Степень работоспособности электрической части трансформатора» и «Степень работоспособности неэлектрической части трансформатора» будем оценивать от 0 до 100 (где 0 - минимальное значение, 100 - максимальное значение степени работоспособности трансформатора).

##### Композиция

Множество допустимых значений переменной называется терм-множеством.

Функции принадлежности крайних терм-множеств были заданы трапецевидной функцией принадлежности.

Для всех остальных терм-множеств был задан треугольный закон изменения функции принадлежности. Функции принадлежности принимают значения в интервале от 0 до 1.



**Рис. 2.** Структурная схема определения работоспособности неэлектрической части трансформатора

На **рис. 3** представлен график функции принадлежности « $I_1$ ».

Функции принадлежности выходной переменной «Степень работоспособности неэлектрической части трансформатора» представлены на **рис. 4**.

##### Импликация

На этом этапе осуществляется нечеткий логический вывод, на основании задаваемой нечеткой базы знаний (набора правил), которая содержит информацию о зависимости между входными и выходными переменными в виде структуры правил «ЕСЛИ-ТО».

Правила задаются на основе экспертных оценок о причине неисправности. Информация о зависимости значений входных переменных от значений степеней работоспособности трансформатора может быть представлена в форме правил нечетких продукций. На **рис. 5** представлен фрагмент базы правил.

##### Агрегация

После этапа импликации идет этап агрегации, на котором на основе правил базы знаний определяется значение выходного вектора в виде вектора нечетких множеств, соответствующего нечетким значениям выходных переменных  $Y^1$ .

##### Дефазификация

Дефазификатор выполняет последний этап нечеткого вывода - дефазификацию. Дефазификатор преобразует вектор нечетких множеств  $Y^1$  в вектор значений выходных переменных  $Y$ .

Для анализа нейросетевой модели визуализируем поверхность нечеткого вывода. На **рис. 6** представлена зависимость между входными элементами ( $I_1$  - «ток в фазах первичной обмотки»); ( $I_2$  - «ток в фазах вторичной обмотки») и выходной переменной -  $SR_{trel}$  «Степень работоспособности электрической части трансформатора».

Степень работоспособности трансформатора в целом задается как среднее геометрическое степеней работоспособности объекта [9].

$$SR = \sqrt{SR_{\text{эл.часть}} \cdot SR_{\text{неэл.часть}}},$$

где  $SR$  - степень работоспособности трансформатора в целом;  $SR_{\text{эл.часть}}$ ,  $SR_{\text{неэл.часть}}$  - степени работоспособности электрической и неэлектрической части трансформатора.

Математическая модель вычисления работоспособности трансформатора приведена на **рис. 7**. Для наглядности вычислений предлагается использовать пакет Matlab Simulink.

Входными переменными являются значения, полученные с датчиков системы диагностирования.

Значения параметров подаются на нечеткие программируемые контроллеры, вычисляются работоспособности отдельно по каждой фазе для электрической части и для неэлектрической, далее вычисляются степени работоспособности электрической и неэлектрической частей. Затем определяется общая степень работоспособности трансформатора.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методология определения степени работоспособности трансформаторов судовых электроэнергетических установок на основе нечеткого

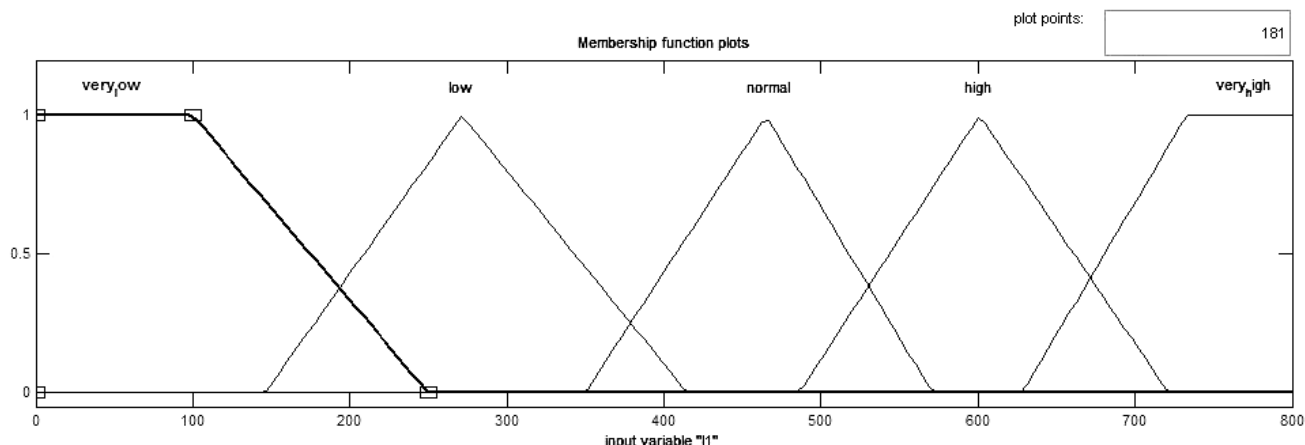


Рис. 3. Функции принадлежности переменной « $I_1$ »

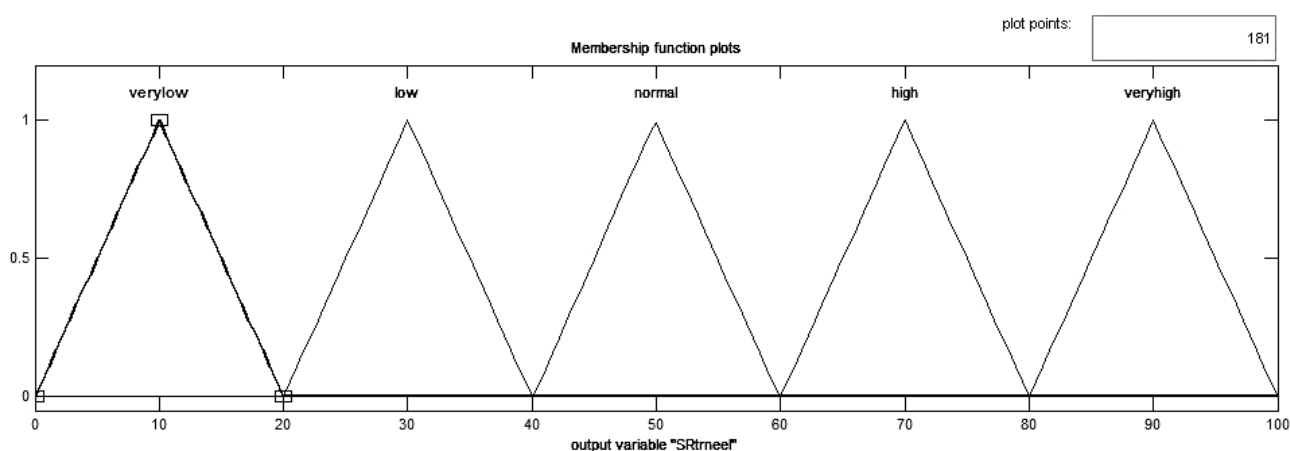


Рис. 4. Функции принадлежности выходной переменной «Степень работоспособности неэлектрической части трансформатора»

1. If (I1 is normal) and (I2 is normal) and (U1 is normal) and (U2 is normal) and (Riz is normal) then (SRtrnel is veryhigh) (1)  
 2. If (I1 is normal) and (I2 is normal) and (U1 is normal) and (U2 is normal) and (Riz is verylow) then (SRtrnel is verylow) (1)  
 3. If (I1 is normal) and (I2 is normal) and (U1 is normal) and (U2 is normal) and (Riz is low) then (SRtrnel is low) (1)  
 4. If (I1 is very\_low) and (I2 is verylow) and (U1 is verylow) and (U2 is verylow) and (Riz is verylow) then (SRtrnel is verylow) (1)  
 5. If (I1 is low) and (I2 is low) and (U1 is low) and (U2 is low) and (Riz is low) then (SRtrnel is low) (1)  
 6. If (I1 is high) and (I2 is high) and (U1 is high) and (U2 is high) and (Riz is normal) then (SRtrnel is high) (1)  
 7. If (I1 is very\_low) and (I2 is normal) and (U1 is normal) and (U2 is normal) and (Riz is normal) then (SRtrnel is verylow) (1)  
 8. If (I1 is low) and (I2 is normal) and (U1 is normal) and (U2 is normal) and (Riz is normal) then (SRtrnel is low) (1)  
 9. If (I1 is high) and (I2 is normal) and (U1 is normal) and (U2 is normal) and (Riz is normal) then (SRtrnel is high) (1)  
 10. If (I1 is very\_high) and (I2 is normal) and (U1 is normal) and (U2 is normal) and (Riz is normal) then (SRtrnel is veryhigh) (1)  
 11. If (I1 is normal) and (I2 is verylow) and (U1 is normal) and (U2 is normal) and (Riz is normal) then (SRtrnel is verylow) (1)  
 12. If (I1 is normal) and (I2 is low) and (U1 is normal) and (U2 is normal) and (Riz is normal) then (SRtrnel is low) (1)

III

If	and	and	and	and
I1 is	I2 is	U1 is	U2 is	Riz is
very_low	verylow	verylow	verylow	verylow
normal	normal	normal	high	normal
very_high	veryhigh	veryhigh	veryhigh	low
low	low	high	low	none
high	high	low	normal	
none	none	none	none	

☐ not

Рис. 5. Фрагмент базы правил

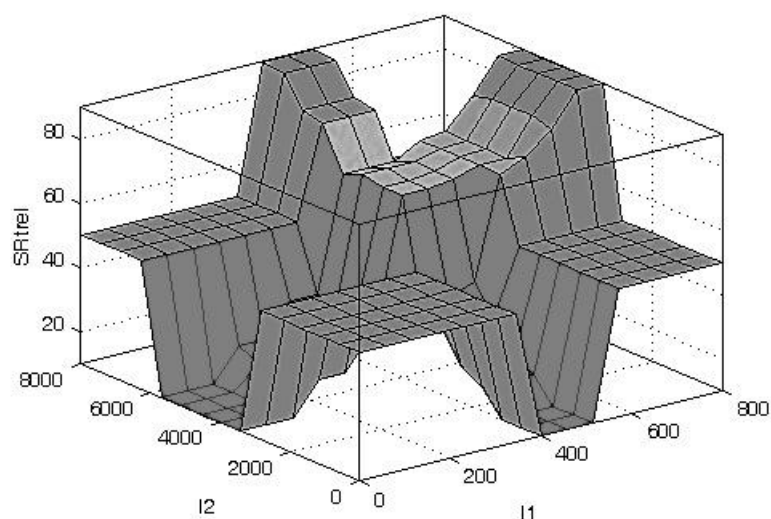


Рис. 6. Визуализация поверхности системы нечеткого вывода

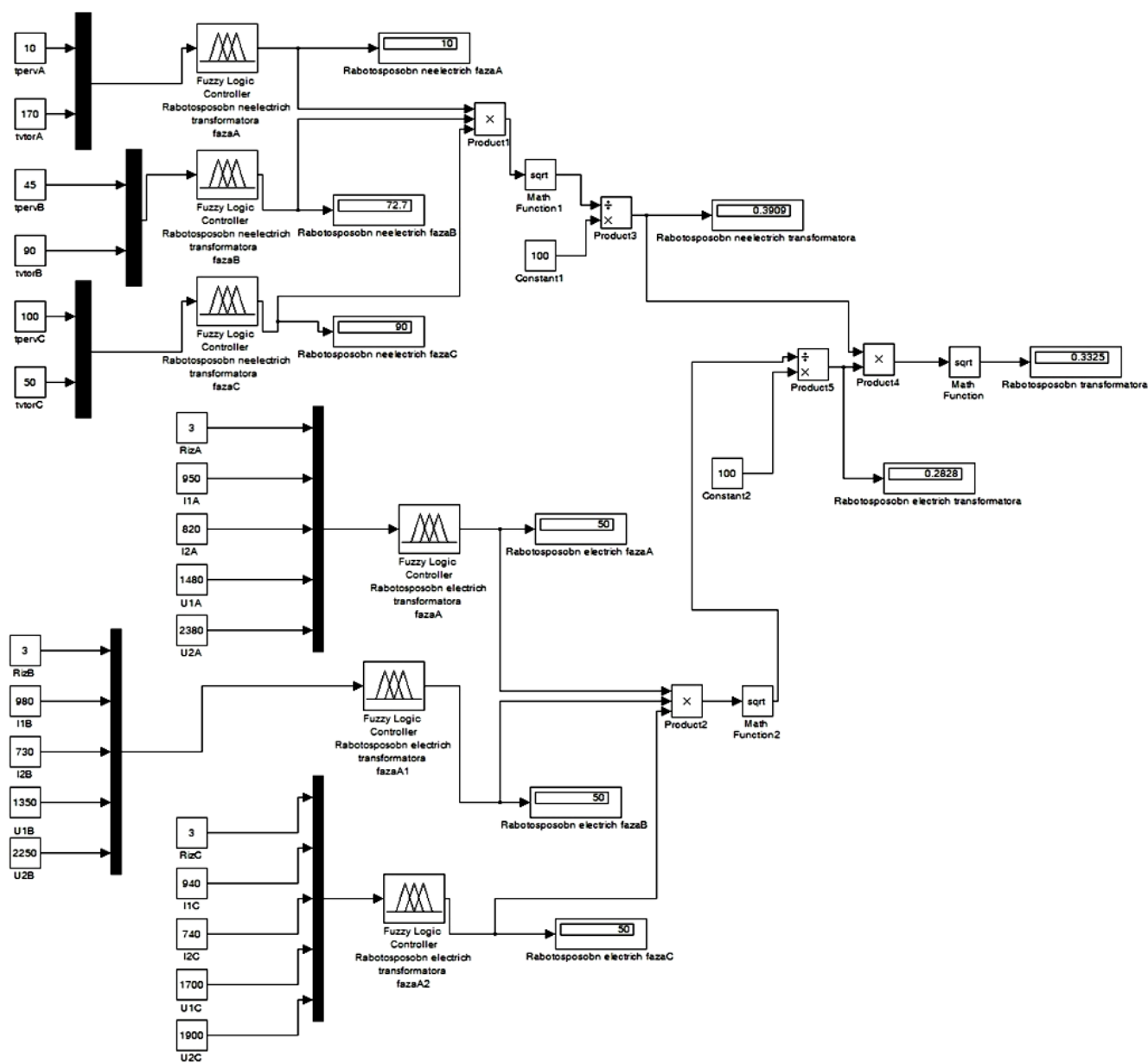


Рис. 7. Вычисление степени работоспособности трансформатора в Matlab Simulink

моделирования. Разработаны структурные схемы для определения работоспособностей электрической и не-электрической частей трансформатора. Разработана нейро-нечеткая модель в Matlab Simulink для определения степени работоспособности трансформаторов судовых электроэнергетических установок. Полученные результаты могут быть применены в экспертной системе прогнозирования технического состояния трансформаторов судовых электроэнергетических установок.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крюков О.В., Серебряков А.В., Васенин А.Б. Диагностика электромеханической части ветроэнергетических установок // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2012. №3. С. 549-552.
2. Крюков О.В., Серебряков А.В. Метод и система принятия решений по прогнозированию технического состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов // *Электротехнические системы и комплексы*. 2015. №4(29). С.35-38.
3. Серебряков А.В., Крюков О.В. Интеллектуальные ветроэнергетические установки для автономных систем электроснабжения. Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексее-

ва, 2014. 120 с.

4. Серебряков А.В., Крюков О.В., Васенин А.Б. Нечеткие модели и алгоритмы управления ветроэнергетическими установками // *Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах: сб. науч. тр.* СПб., 2012. С. 467-469
5. Дифференцирование нагрузки в системах электроснабжения автономных потребителей / А.В. Серебряков, В.Г. Титов, Е.А. Чернов, А.В. Шахов // *Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева* 2015. № 2(109). С. 203-209.
6. Серебряков А.В. Оптимизация диагностирования электромеханической части ветроэнергетических установок // *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт*. 2013. №3. С.39-46.
7. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Телеком 2007. 288 с.
8. Стеклов А.С., Подковырин Д.С. Нейронечеткая модель диагностирования технического состояния синхронного генератора // *Главный энергетик*. 2015. № 11-12. С. 55-60.
9. Стеклов А.С., Титов В.Г., Серебряков А.В. Определение степени работоспособности судовых синхронных генераторов с применением искусственных нейро-нечетких сетей // *Вестник Чувашского университета*. 2016. №1. С.97-104.

Поступила в редакцию 05 мая 2016 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

## NEURO-FUZZY MODELING OF THE DEGREE OF EFFICIENCY OF TRANSFORMERS AT SHIP ELECTRIC POWER PLANTS

Aleksey S. Steklov

Post-Graduate Student, department of Electrical equipment, electric drive and automation, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia. E-mail: steklov84@mail.ru.

An urgent task is to develop forecasting systems of technical condition of ship electric power plant transformers. One solution to the problem is to use artificial neural networks. For the first time a comprehensive approach based on artificial neural networks was offered to the determination of the degree of efficiency of transformers at shipboard electric power plants. The results can be the basis for a new system of forecasting of technical condition of ship electric power plant transformers.

**Keywords:** Neuro-fuzzy network, transformer, electricity installation, diagnosis, degree of efficiency.

# REFERENCES

1. Kryukov O.V., Serebryakov A.V., Vasenin A.B. Diagnosis of Electromechanical Parts of Wind Power Plants. *Elektromekhanichni i energoz-berigayuchi sistemi* [Electromechanical and energy saving systems], 2012, no.3, pp.549-552. (In Russian).
2. Kryukov O.V., Serebryakov A.V. Method and System of Decision-making in Forecasting of Technical condition of Electrically Driven Gas Pumping Units. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical systems and complexes], 2015, no.4(29), pp.35-38. (In Russian).
3. Serebryakov A.V., Kryukov O.V. *Intellektualnye vetroenergeticheskie ustanovki dlya avtonomnykh sistem elektrosnabzheniya* [Intelligent Wind Turbines for Independent Power Supply Systems]. Nizhnii Novgorod: Nizhegorodskii gosudarstvennii tekhnicheskii universitet im. R.E. Alekseeva Publ., 2014. 120 p.

4. Serebryakov A.V., Kryukov O.V., Vasenin A.B. Fuzzy Model and Wind Turbine Control Algorithms. *Upravlenie v tekhnicheskikh, ergaticheskikh, organizatsionnykh i setevykh sistemakh: sb. nauchn. tr.* [Management of Engineering, ergatic, organizational and network systems. Collection of scientific papers], 2012, pp.467-469. (In Russian).
5. Serebryakov A.V., Titov V.G., Chernov E.A., Shakhov A.V. Differentiation Loads in Autonomous Consumer Power Systems. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of the Nizhny Novgorod Alekseev State Technical University], 2015, no.2(109), pp.203-209. (In Russian).
6. Serebryakov A.V. Optimization of Diagnostics of Electromechanical Parts of Wind Power Plants. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont* [Electrical equipment: maintenance and repair], 2013, no.3, pp.39-46. (In Russian).
7. Shtovba S.D. *Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB* [Design of Fuzzy Systems Using MATLAB tools]. Moscow, Telekom Publ., 2007. 288 p.
8. Steklov A.S., Podkovyrin D.S. Neuro-fuzzy Model of Diagnostics of Technical Condition of Synchronous Generator. *Glavnyi energetik* [Chief Power Engineer], 2015, no.11-12, pp.55-60. (In Russian).
9. Steklov A.S., Titov V.G., Serebryakov A.V. Determining the Degree of Efficiency of Marine Synchronous Generators Using Artificial Neural Fuzzy Networks. *Vestnik Chuvashskogo universiteta* [Bulletin of Chuvash University], 2016, no.1, pp.97-104. (In Russian).