

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СОЛНЕЧНО-ВЕТРЯНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С НЕЙРО-НЕЧЕТКОЙ СИСТЕМОЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

В настоящее время в связи с ухудшающейся экологической обстановкой увеличение доли возобновляемых источников энергии является основным направлением развития электроэнергетических отраслей многих стран. Важным этапом создания новых энергетических установок является имитационное моделирование, позволяющее проанализировать работу аппаратуры в различных условиях, включая нарушение пределов нормальной эксплуатации, уменьшить количество возможных ошибок проектирования. В данной статье описывается разработка и применение имитационной модели системы выработки электрической энергии на основе возобновляемых источников с системой оценки и прогнозирования технического состояния оборудования. Имитационная модель реализована в среде *Matlab Simulink*. Получены осциллограммы токов и напряжений при работе модели с мощностью электрической нагрузки 10 кВА для преобразователей ветряной и солнечной энергии. Разработана система мониторинга технического состояния оборудования на основе системы нечеткого ввода Мамдани-Заде, формирующая оценку технического состояния элементов энергоустановки на основании диагностических параметров в соответствии с базой экспертных правил. Полученные оценки технического состояния оборудования обрабатываются при помощи адаптивной нейро-нечеткой системы вывода (*ANFIS*), в результате работы которой формируется прогноз технического состояния оборудования на заданном временном отрезке. Построенная модель может быть использована при проектировании объектов возобновляемой энергетики, а также разработке и испытании алгоритмов систем управления и мониторинга. Система оценки и прогнозирования состояния оборудования с применением аппарата нечеткой логики может использоваться для поддержки принятия решений оператором электроэнергетической установки при определении необходимости ремонта и замены оборудования.

**Ключевые слова:** возобновляемая энергетика, имитационная модель, нечеткая логика, диагностика технического состояния, система мониторинга.

### ВВЕДЕНИЕ

Для генерирующего комплекса на основе возобновляемых источников энергии важными свойствами являются надежность работы и бесперебойность электроснабжения потребителей. Основным же способом поддержания высокой работоспособности любой технической системы является своевременное обнаружение и замена изношенных и устаревших ее элементов. В настоящее время общепринятой практикой является проведение планового технического обслуживания, в ходе которого производится оценка работоспособности элементов системы и принимается решение о необходимости их замены и ремонта.

Однако зачастую выход оборудования из строя происходит раньше запланированного технического обслуживания, что приводит к значительным негативным последствиям. Основой для определения периодичности планового технического обслуживания служат данные о надежности элементов (интенсивность отказов, среднее время безотказной работы), предоставляемых их производителем по результатам испытаний определенного количества образцов. Однако из-за того, что условия эксплуатации и события, происходящие при функционировании каждого элемента, являются уникальными, каждый элемент может выйти из строя раньше или позже среднего срока, объявленного производителем.

Для более точного контроля работоспособности элемента системы, а также прогнозирования момента

выхода из строя необходимо осуществлять непрерывный мониторинг технологических и физических параметров данного элемента.

Исследования, ведущиеся в данном направлении, имеют большую важность и являются актуальными, поскольку имеют своей целью предотвращение внезапных отказов оборудования, зачастую приводящих к материальным потерям, а также создающих опасность жизни и здоровью людей.

Разработки в этой области ведут научно-производственные компании, такие как *Semiotic Labs*, *Dynapar*, *CMS Condition Monitoring Systems*, *Brüel & Kjær Vibro*, *Ifm efector Canada*. В научных работах предлагаются различные методы и подходы к построению систем мониторинга (метод реконструкционного моделирования [1], метод вычисления индекса состояния оборудования [2], методы спектрального анализа [3]), а также оценка работоспособности оборудования разных видов (электродвигатели [4], турбогенератор и силовой трансформатор [5], силовой трансформатор [6], управляемый выпрямитель [7]). Однако в настоящее время вопрос создания систем мониторинга технического состояния не имеет однозначного решения, что связано с различиями объектов диагностики, наличием преимуществ и недостатков у разных видов систем мониторинга, а также с постоянным прогрессом вычислительной техники и средств обработки данных, требующих пересмотра и совершенствования существующих решений.

Целью данной работы является построение имитационной модели комбинированной солнечно-ветровой

электростанции с системой мониторинга и прогнозирования технического состояния оборудования: ветрогенератора, фотоэлектрических преобразователей, инвертора напряжения, преобразователя частоты. Под техническим состоянием в данной работе подразумевается состояние объекта (вышеперечисленных устройств), характеризующее совокупностью установленных в документации параметров, описывающих его способность выполнять требуемые функции в рассматриваемых условиях. В данной работе применяются системы оценки технического состояния с использованием аппарата нечеткой логики. Новая методика работы системы оценки, предлагаемая авторами, заключается в следующем. Для каждого устройства, техническое состояние которого подлежит оценке, формируется перечень диагностических параметров. На основе величин диагностических параметров при помощи системы нечеткого вывода Мамдани-Заде по перечню логических правил, определенному экспертами в области эксплуатации и ремонта соответствующих устройств, формируется оценка качества функционирования оборудования в каждый конкретный момент времени. Интегрирование данной величины позволяет получить оценку технического состояния оборудования с учетом происшедших нарушений условий нормальной эксплуатации, которые ухудшают техническое состояние оборудования. Под оценкой технического состояния в данной работе подразумевается условное количественное выражение технического состояния устройства; при этом максимальное значение данной оценки обозначает полностью работоспособное техническое состояние устройства без признаков износа и физического старения, а минимальное значение обозначает техническое состояние неисправного устройства, не подлежащего восстановлению. На основе полученных оценок технического состояния с применением адаптивной нейро-нечеткой системы вывода формируется прогноз технического состояния оборудования.

#### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве основного метода исследования в рамках данной работы было использовано имитационное моделирование в среде *Matlab Simulink* с применением расширения *Fuzzy Logic Toolbox*. На **рис. 1** представлена имитационная модель в среде *Matlab Simulink*.

Имитационная модель включает в себя следующие элементы: преобразователь солнечной энергии, преобразователь энергии ветра, трехфазная электрическая нагрузка активно-индуктивного характера, системы мониторинга технического состояния устройств. Объединение каналов преобразования энергии производится при помощи шины переменного тока.

Преобразователь солнечной энергии состоит из блока фотоэлектрических модулей *PV Array* с номинальной электрической мощностью 10 кВА и трехфазного мостового инвертора напряжения. Температура фотоэлектрических преобразователей и мощность солнечного излучения задаются пользователем путем из-

менения значений входных сигналов в подсистеме *PV Array*.

Преобразователь энергии ветра включает в себя блок ветровой турбины *Simple Turbine* с номинальной электрической мощностью 10 кВА, синхронный генератор с постоянными магнитами и преобразователь частоты со звеном постоянного тока, компенсирующий колебания частоты выходного напряжения при изменении скорости ветра. Пользователь может задавать скорость ветра, изменяя значение сигнала в подсистеме *Simple Turbine*.

Задача системы диагностики заключается в формировании оценки технического состояния устройств, входящих в состав электроэнергетического комплекса. Данная оценка позволяет персоналу комплекса иметь информацию о работоспособности устройств в любой момент времени, а также прогнозировать возникновение аварийных ситуаций. Оценка формируется на основе информации о параметрах, влияющих на работу устройств и характеризующих качество их работы. В настоящее время нет технической возможности получения в реальном времени всей диагностической информации, необходимой для однозначной оценки технического состояния устройства, такой как степень старения материалов, появление микроскопических деформаций и дефектов элементов. Кроме того, изменение нагрузок и условий эксплуатации зачастую носит стохастический характер. Из-за данных обстоятельств оценка и прогноз технического состояния осуществляется в условиях несовершенства и неполноты исходной информации. Однако накопленные знания и опыт многих экспертов по эксплуатации и ремонту оборудования позволяют им принимать верные управленческие решения при оценке технического состояния оборудования и превентивной замене устаревшего оборудования даже на основе неполных и несовершенных исходных данных.

Для формализации опыта экспертного сообщества и построения системы, оказывающей поддержку оператору при принятии решений, эффективным методом является применение методов нечеткой логики. Такой подход позволяет увеличить гибкость системы оценки при помощи использования наборов правил, а также нелинейных функций принадлежности элементов, позволяющих системе формировать корректный результат при зашумленности и неполноте входных данных. Перечень логических правил, по которым формируется оценка, должен быть составлен экспертами по эксплуатации и ремонту соответствующих электротехнических устройств. Более подробно вопрос формирования перечней правил для оценки состояния различных типов оборудования рассматривался в работах [8-10]. В рамках данной работы используется тестовый набор правил, который должен быть уточнен при использовании с конкретными образцами оборудования.

В качестве примера рассмотрим структуру системы оценки качества работы синхронного генератора. Система в среде *Fuzzy Logic Toolbox* представлена на **рис. 2**.

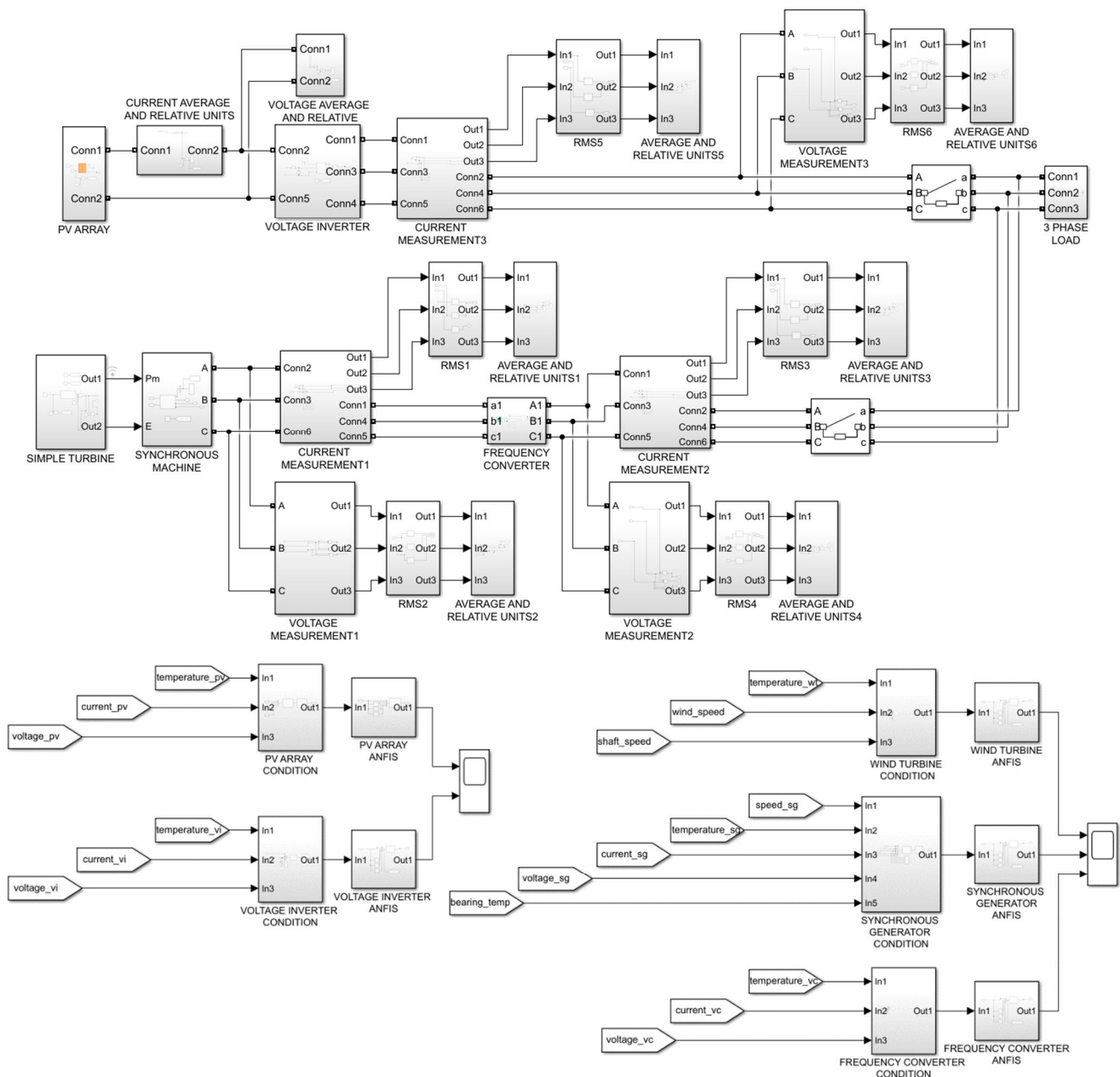


Рис. 1. Имитационная модель комбинированной системы выработки электроэнергии в среде Matlab Simulink

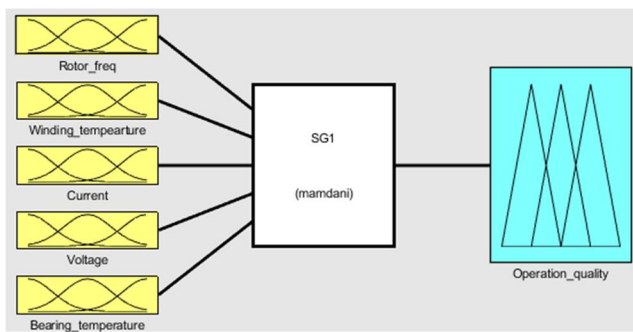


Рис. 2. Система оценки качества работы синхронного генератора в среде Fuzzy Logic Toolbox

В перечень диагностических параметров, на основе которых формируется оценка качества работы, входят частота вращения вала генератора, температура меди статора генератора, среднее арифметическое действующих значений токов фаз статора, среднее арифметическое действующих значений линейных напряжений

статора, температура металла подшипников. Данный перечень не является исчерпывающим и может быть дополнен или изменен в соответствии со спецификой конкретного объекта диагностики. Используемые величины приводятся к относительным единицам в соответствии с номинальными параметрами синхронного генератора. Для входной переменной «Частота вращения вала» используется три термина: «Низкий», «Нормальный» и «Высокий». Для входной переменной «Температура меди» используются два термина: «Нормальный» и «Высокий». Для входной переменной «Среднее значение тока» используются три термина: «Низкий», «Нормальный» и «Высокий». Для входной переменной «Среднее значение напряжения» используются три термина: «Низкий», «Нормальный» и «Высокий». Для входной переменной «Температура подшипников» используются три термина: «Низкий», «Нормальный» и «Высокий». Выходной переменной системы нечеткого вывода является «Качество работы

синхронного генератора», для которого используются три термина «Низкое», «Нормальное» и «Высокое». Качество работы оценивается как высокое при нахождении всех диагностических параметров в пределах нормы. При отклонении каких-либо параметров от нормы качество работы оценивается как нормальное или низкое в соответствии с сформированным тестовым перечнем из восьми правил следующего вида:

1. If (Rotor\_freq is Normal) and (Winding\_tempearture is Normal) and (Current is Normal) and (Voltage is Normal) and (Bearing\_temperature is Normal) then (Operation\_quality is High).

2. If (Rotor\_freq is High) and (Winding\_tempearture is Normal) and (Current is Normal) and (Voltage is Normal) then (Operation\_quality is Normal).

3. If (Rotor\_freq is Normal) and (Winding\_tempearture is High) and (Current is Normal) and (Voltage is Normal) then (Operation\_quality is Normal).

4. If (Rotor\_freq is Normal) and (Winding\_tempearture is Normal) and (Current is High) and (Voltage is Normal) then (Operation\_quality is Low).

5. If (Rotor\_freq is Normal) and (Winding\_tempearture is High) and (Current is High) and (Voltage is Normal) then (Operation\_quality is Low).

6. If (Rotor\_freq is Normal) and (Winding\_tempearture is Normal) and (Current is High) and (Voltage is Low) then (Operation\_quality is Low).

7. If (Rotor\_freq is Normal) and (Voltage is Low) then (Operation\_quality is Low).

8. If (Rotor\_freq is High) and (Winding\_tempearture is Normal) and (Current is Normal) and (Voltage is Normal) and (Bearing\_temperature is High) then (Operation\_quality is Low).

Оценка качества работы формируется по шкале от нуля до ста процентов. Системы оценки качества работы фотоэлектрических преобразователей, ветровой турбины, инвертора напряжения, преобразователя частоты строятся по такому же принципу и описаны в [11-13].

Изменяющиеся условия работы оказывают непосредственное влияние на техническое состояние аппаратуры. Для учета необратимого изменения технического состояния устройства выходная переменная системы нечеткого вывода («Оценка качества работы») вычитается из единицы, полученная величина интегрируется и вычитается из начального уровня технического состояния устройства, который принимается равным единице. Данную взаимосвязь можно представить выражением

$$TC(p) = 1 - \frac{1 - k \cdot OQ(p)}{Tp}, \quad (1)$$

где  $TC(p)$  – оценка технического состояния устройства;  $OQ(p)$  – оценка качества работы, сформированная системой нечеткого вывода;  $T$  – постоянная времени интегрирования;  $k$  – коэффициент настройки;  $p$  – оператор Лапласа.

Для получения корректных результатов оценки постоянная времени интегрирования и коэффициент настройки должны определяться экспертным путем с учетом экспериментальных исследований конкретного объекта диагностики. В рамках данной работы применяются тестовые значения.

На рис. 3 представлен блок, формирующий оценку технического состояния синхронного генератора в среде *Matlab Simulink*.

Для выработки прогноза технического состояния оборудования полученные оценки обрабатываются при помощи адаптивной нейро-нечеткой системы вывода. В качестве примера рассмотрим устройство системы прогнозирования технического состояния синхронного генератора (рис. 4). Системы прогнозирования состояния ветровой турбины, преобразователя частоты, фотоэлектрических преобразователей и инвертора напряжения имеют аналогичный принцип работы.

Для формирования прогнозируемого технического состояния для момента времени  $t+60$  секунд построенная система использует четыре известных значения оценки технического состояния в моменты времени  $t$ ,  $t-5$ ,  $t-10$ ,  $t-15$  секунд. Система прошла 10 эпох обучения, в результате минимальная величина среднеквадратической ошибки при прогнозировании составила 3,6%. Для проверки работоспособности системы использован тестовый график с различным характером изменения оценки технического состояния.

На рис. 5 представлено наложение тестового графика оценки технического состояния, использованного в качестве эталона (пунктирная линия) и графика оценки, полученного путем формирования прогноза (сплошная линия).

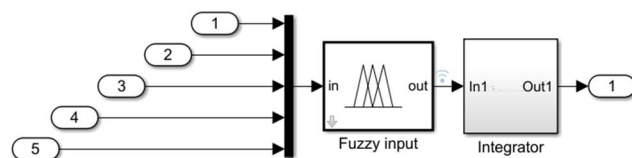


Рис. 3. Блок формирования оценки технического состояния синхронного генератора

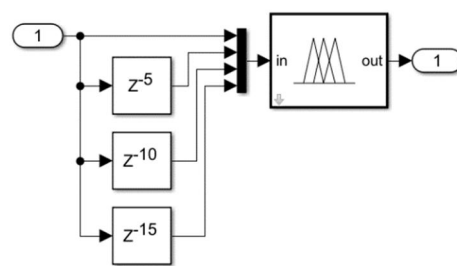


Рис. 4. Блок прогнозирования технического состояния синхронного генератора

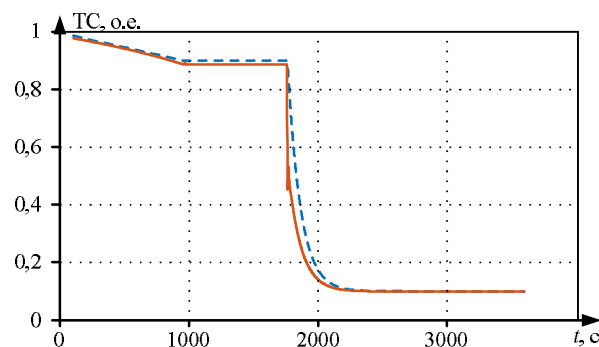


Рис. 5. Работа системы прогнозирования: эталонный график (пунктирная линия), прогнозируемое техническое состояние (сплошная линия)

Как видно из графиков, при заданных параметрах прогнозируемая оценка технического состояния чаще оказывается ниже фактической. Изменение количества эпох обучения и объема обучающих данных может улучшить точность прогноза, но в рамках данной работы достигнутая точность является приемлемой, поэтому переобучение нейронной сети не выполнялось.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При моделировании рассматривается работа установок в рамках режима нормальной эксплуатации, при котором величины диагностических параметров не превышают норму, а также при увеличении электрической мощности нагрузки сверх допустимого уровня.

На рис. 6 представлены осциллограммы работы преобразователя солнечной энергии с номинальной электрической мощностью нагрузки, равной 10 кВА,  $\cos\varphi$  0,9. Приводятся осциллограммы линейного напряжения нагрузки АВ, тока фазы нагрузки А. THD (Total harmonic distortion) напряжения нагрузки составляет 1,3%, действующее значение первой гармоники напряжения равно 382 В. Действующее значение первой гармоники тока равно 14,8 А.

На рис. 7 представлены осциллограммы работы преобразователя энергии ветра с номинальной электрической мощностью нагрузки, равной 10 кВА,  $\cos\varphi$  0,9. Приводятся осциллограммы линейного напряжения нагрузки АВ, тока фазы нагрузки А. THD напряжения нагрузки составляет 1,2%, действующее значение первой гармоники напряжения равно 380 В. Действующее значение первой гармоники тока равно 14,7 А.

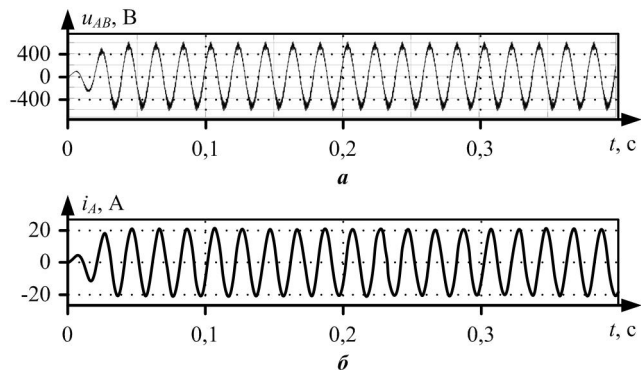


Рис. 6. Осциллограммы нагрузки при работе преобразователя солнечной энергии: а – линейное напряжение нагрузки; б – ток фазы нагрузки

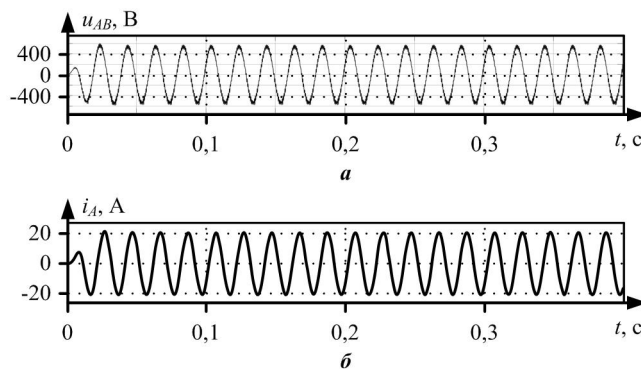


Рис. 7. Осциллограммы нагрузки при работе преобразователя ветровой энергии: а – линейное напряжение нагрузки; б – ток фазы нагрузки

На рис. 8 представлены графики изменения оценок технического состояния для фотоэлектрических преобразователей и инвертора напряжения, полученные при работе систем оценки с тестовым перечнем логических правил и коэффициентов при номинальной величине электрической нагрузки. Следует отметить, что для большей наглядности графиков тестовый коэффициент изменения технического состояния в системе оценки был значительно увеличен, поскольку моделирование выполняется на малом временном интервале.

На рис. 9 представлены графики изменения оценок технического состояния для синхронного генератора и преобразователя частоты, полученные при работе систем оценки с тестовым перечнем логических правил и коэффициентов при номинальной величине электрической нагрузки.

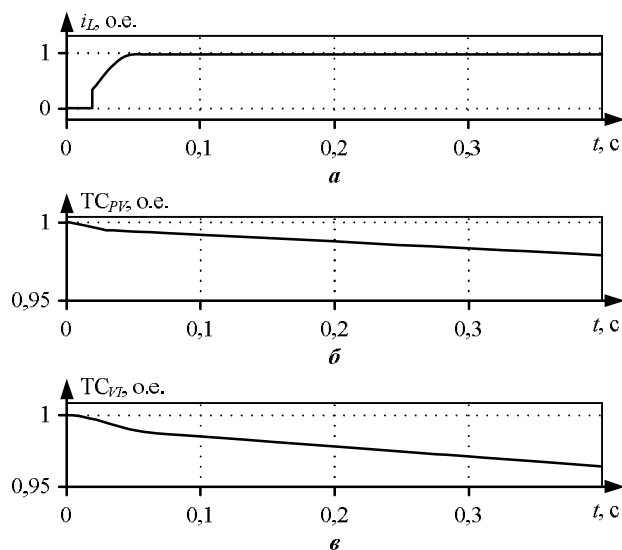


Рис. 8. Оценка технического состояния при номинальной нагрузке: а – действующее значение тока фазы нагрузки в относительных единицах; б – оценка технического состояния фотоэлектрических преобразователей; в – оценка технического состояния инвертора напряжения

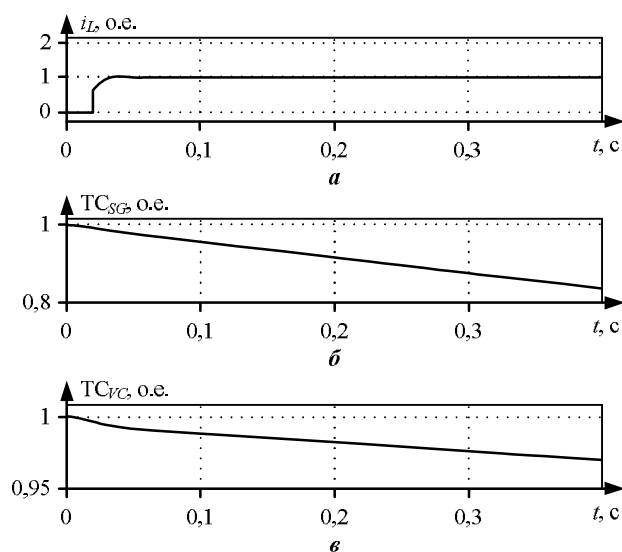
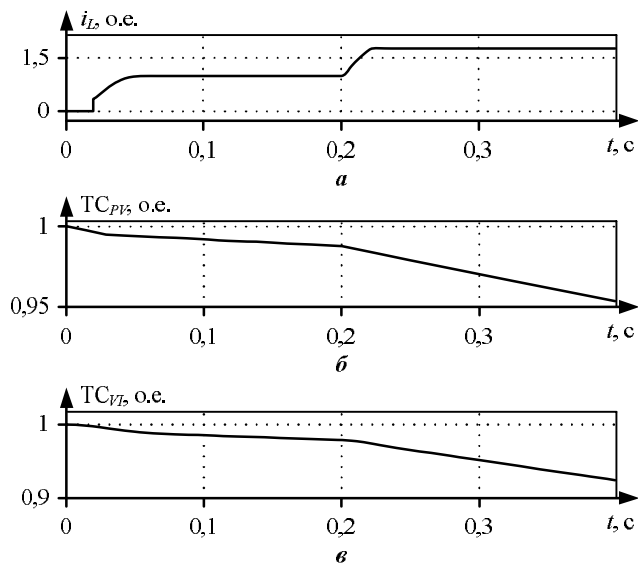


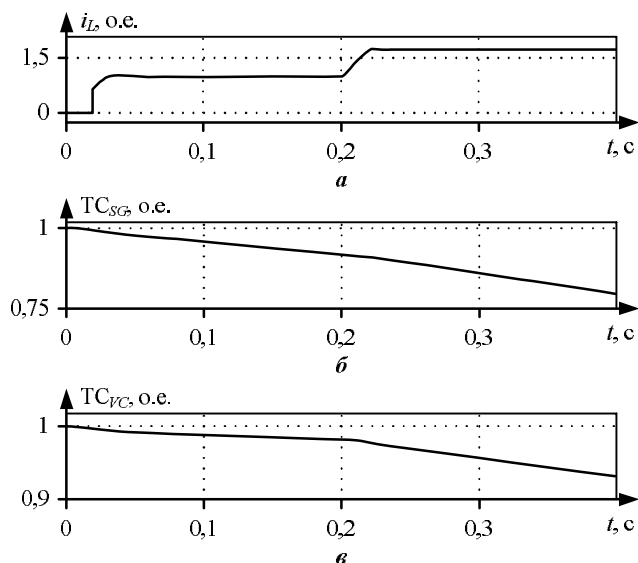
Рис. 9. Оценка технического состояния при номинальной нагрузке: а – действующее значение тока фазы нагрузки в относительных единицах; б – оценка технического состояния синхронного генератора; в – оценка технического состояния преобразователя частоты

Рассмотрим изменение оценки технического состояния оборудования при увеличении тока нагрузки до 170% от номинального значения в момент времени 0,2 с. На **рис. 10** представлены графики изменения оценок технического состояния для фотоэлектрических преобразователей и инвертора напряжения.

На **рис. 11** представлены графики изменения оценок технического состояния для синхронного генератора и преобразователя частоты, полученные при работе систем оценки с тестовым перечнем логических правил и коэффициентов при увеличении тока нагрузки до 170% от номинального значения в момент времени 0,2 с.



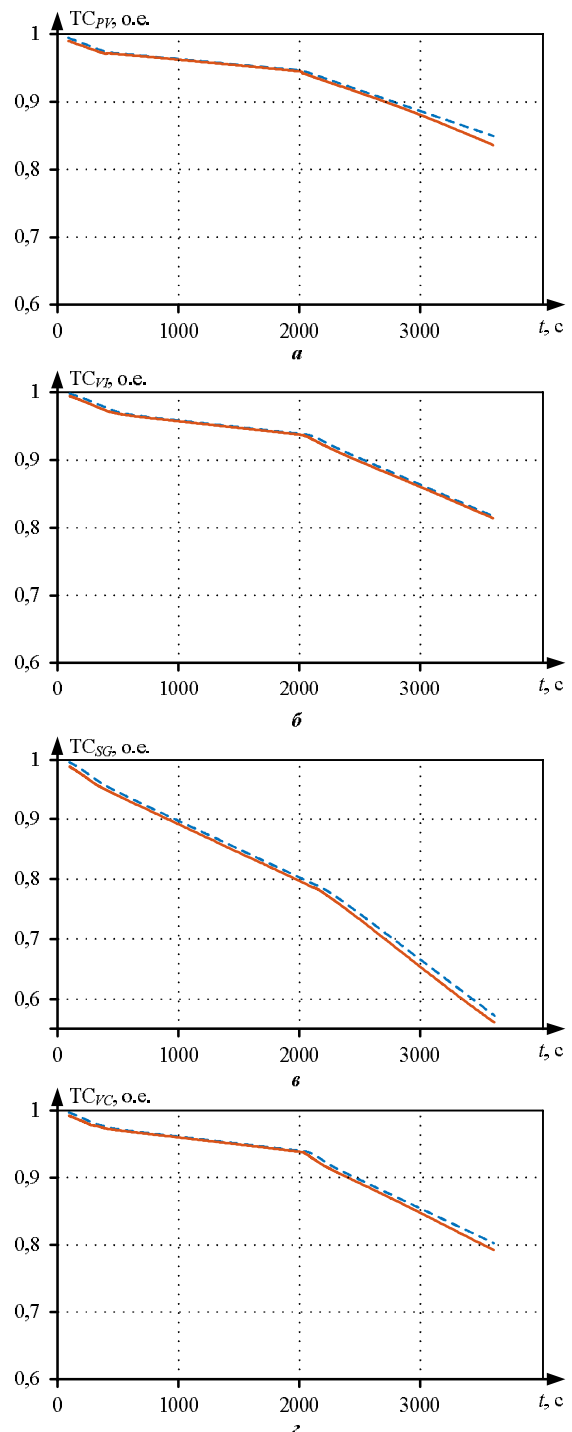
**Рис. 10.** Оценка технического состояния при увеличении тока нагрузки в момент 0,2 с: **а** – действующее значение тока фазы нагрузки в относительных единицах; **б** – оценка технического состояния фотоэлектрических преобразователей; **в** – оценка технического состояния инвертора напряжения



**Рис. 11.** Оценка технического состояния при увеличении тока нагрузки в момент 0,2 с: **а** – действующее значение тока фазы нагрузки в относительных единицах; **б** – оценка технического состояния синхронного генератора; **в** – оценка технического состояния преобразователя частоты

В момент времени 0,2 с оценка технического состояния уменьшается интенсивнее, чем на соответствующих графиках **рис. 8, 9**, что вызвано превышением номинального значения током нагрузки. Функционирование систем оценки технического состояния оборудования соответствует ожидаемому.

Проверка работы систем прогнозирования выполнялась на основе графиков оценок технического состояния длительностью один час. На **рис. 12** представлены графики эталонного и спрогнозированного значения технического состояния для фотоэлектрических преобразователей, инвертора напряжения, синхронного генератора, преобразователя частоты.



**Рис. 12.** Графики эталонного и спрогнозированного технического состояния: **а** – фотоэлектрических преобразователей; **б** – инвертора напряжения; **в** – синхронного генератора; **г** – преобразователя частоты



Максимальная величина отклонения прогнозируемого значения от эталонного составила 0,013 для фотоэлектрических преобразователей, 0,0058 – для инвертора напряжения, 0,012 – для синхронного генератора, 0,01 – для преобразователя частоты.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приводятся результаты разработки имитационной модели генерирующего комплекса на основе возобновляемых источников энергии с системой мониторинга технического состояния оборудования. Выполнено моделирование работы в среде *Matlab Simulink* при мощности электрической нагрузки 10 кВА,  $\cos\varphi$  0,9 и частоте напряжения нагрузки 50 Гц, получены осциллограммы тока фазы и линейного напряжения нагрузки, а также построены графики изменения оценки технического состояния устройств энергетического комплекса при нарушении условий нормальной эксплуатации в виде увеличения тока нагрузки до 170% от номинального значения. Построены графики прогнозов технического состояния устройств с горизонтом прогнозирования 60 секунд. При работе модели возможно воспроизведение процессов, происходящих при изменении мощности солнечного излучения, скорости ветра, задания на амплитуду и частоту выходного напряжения преобразователей, параметров электрической нагрузки. Построенная имитационная модель может использоваться при проектировании объектов возобновляемой энергетики, разработке и испытании алгоритмов систем управления, а также исследовании различных режимов работы электроэнергетического комплекса. Разработанные системы оценки технического состояния оборудования могут быть использованы для мониторинга энергетического комплекса с целью предупреждения внезапных отказов, а также для оказания поддержки специалистам по эксплуатации и ремонту при принятии решения о превентивной замене и ремонте устройств. Важно отметить, что для получения корректных оценок и прогнозов технического состояния оборудования необходима настройка системы мониторинга и прогнозирования на основании данных, полученных при работе реального оборудования. В связи с этим направлением дальнейшего исследования является верификация результатов имитационного моделирования при помощи физической модели.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Real-time condition monitoring and fault detection of components based on machine-learning reconstruction model / C. Yang, J. Liu, Y. Zeng, G. Xie // *Renewable Energy*. 2019. No. 133. Pp. 433-441. doi: 10.1016/j.renene.2018.10.062.
2. Назарычев А.Н., Новомлинский Э.В., Андреев Д.А. Оценка технического состояния электрооборудования на основе расчетов интегральных показателей // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: материалы Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко. Сыктывкар: ООО «Коми республиканская типография», 2016. С. 171-179.
3. Gangsar P., Tiwari R. Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. Vol. 144. Pp. 1-37. doi: 10.1016/j.ymssp.2020.106908.
4. Condition monitoring and fault diagnosis of induction motors: A Review / A. Choudhary, D. Goyal, S. Letha Shimi, A. Akula // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2019. No. 26. Pp. 1221-1238. doi: 10.1007/s11831-018-9286-z.
5. Байдок М. А., Комарова Г. В. Оценка технического состояния и надежности электрических машин // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2019. № 3. С. 78-84.
6. Левин В.М., Керимкулов Н.Н. Экспресс-оценка состояния силовых трансформаторов для обеспечения эксплуатационной надежности // *Системы. Методы. Технологии*. 2016. № 4(32). С. 101-109. doi: 10.18324/2077-5415-2016-4-101-109.
7. Condition monitoring of PWM converter based on multiple support vector machine algorithm / M. Shi, J. Wang, Y. Xu, K. Huang, H. Li, P. Wang // *10th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*. IEEE, 2019. Pp. 264-268. doi: 10.1109/PEDG.2019.8807567.
8. Стеклов А.С., Титов В.Г., Серебряков А.В. Применение экспертных систем для обработки результатов диагностирования // *Научный альманах*. 2015. № 10-3(12). С. 247-250.
9. Саушев А.В. Области работоспособности электротехнических систем. СПб.: Политехника, 2013. 412 с.
10. Серебряков А.В., Стеклов А.С., Титов В.Г. Мониторинг и прогнозирование технического состояния автономных электротехнических комплексов. Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, 2018. 174 с.
11. Кочеганов Д.М., Серебряков А.В. Применение аппарата нечеткой логики для оценки качества функционирования синхронного генератора // *Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов (ЭЭП-2019): сборник трудов всероссийской конференции*. Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2019, С. 186-189.
12. Кочеганов Д.М., Серебряков А.В. Система оценки качества функционирования преобразователя частоты с использованием нечеткой логики // *Интеллектуальная электротехника*. 2019. №4 (8). С. 27-34.
13. Кочеганов Д.М., Серебряков А.В., Применение нечеткой логики для оценки качества функционирования фотоэлектрических панелей // *Федоровские чтения: материалы международной конференции*. М.: Издательский дом МЭИ, 2019. С. 300-304.

Поступила в редакцию 17 марта 2021 г.

#### INFORMATION IN ENGLISH

### SIMULATION MODEL OF A WIND-SOLAR POWER PLANT WITH A TECHNICAL CONDITION NEURO-FUZZY FORECASTING SYSTEM

Damir M. Kochegarov

Postgraduate student, Institute of Electric Power Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia. E-mail: dk402@yandex.ru.

Artem V. Serebryakov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Institute of Electric Power Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.

Alexey S. Steklov

Ph.D. (Engineering), Engineer, Institute of Electric Power Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.

Currently, due to the deteriorating environmental situation, an increase in the share of renewable energy sources is the main direction for the development of the electric power industries in many countries. An important stage in the creation of new power plants is simulation, which makes it possible to analyze the operation of equipment in various conditions, including violation of the limits of normal operation, and to reduce the number of possible design errors. This article describes the development and application of a simulation model of a system for generating electricity based on renewable sources with a system for assessing and predicting the technical condition of equipment. The simulation model is implemented in the Matlab Simulink environment. Oscillograms of currents and voltages were obtained when the model was operating with an electrical load of 10 kVA for converters of wind and solar energy. A system for monitoring the technical condition of equipment based on the Mamdani-Zade fuzzy input system has been developed, which forms an assessment of the technical condition of the power plant elements based on diagnostic parameters in accordance with the base of expert rules. The obtained estimates of the technical condition of the equipment are processed using an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS), which forms a forecast of the technical condition of the equipment at a given time interval. The constructed model can be used in the design of renewable energy facilities, as well as in the development and testing of algorithms for control and monitoring systems. The system for assessing and predicting the state of equipment using a fuzzy logic apparatus can be used to support decision-making by the operator of an electric power plant when determining the need for repair and replacement of equipment.

**Keywords:** renewable energy, simulation model, fuzzy logic, technical condition diagnostics, monitoring system.

#### REFERENCES

1. Yang C., Liu J., Zeng Y., Xie G. Real-time condition monitoring and fault detection of components based on machine-learning reconstruction model. *Renewable Energy*. 2019. No. 133. Pp. 433-441. doi: 10.1016/j.renene.2018.10.062.
2. Nazarychev A.N., Novomlinsky E.V., Andreev D.A. Assessment of the technical condition of electrical equipment based on calculations of integral indicators. *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bolshikh sistem energetiki: materialy Mezhdunarodnogo nauchnogo seminar im. Yu.N. Rudenko*. [Methodological issues in the study of the reliability of large energy systems. Yu.N. Rudenko International Scientific Seminar]. Syktyvkar, Komi Republican Printing House, 2016, pp. 171-179. (In Russian)
3. Gangsar P., Tiwari R. Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. Vol. 144. Pp. 1-37. doi: 10.1016/j.ymssp.2020.106908.
4. Choudhary A., Goyal D., Letha Shimi S., Akula A. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motors: A Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2019. No. 26. Pp. 1221-1238. doi: 10.1007/s11831-018-9286-z.
5. Baydyuk M.A., Komarova G.V. Assessment of the technical condition and reliability of electrical machines. *Izvestiya SPbGETU «LETI»* [Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University], 2019, no. 3, pp. 78-84. (In Russian)
6. Levin V.M., Kerimkulov N.N. Express assessment of the state of power transformers to ensure operational reliability. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. [Systems. Methods. Technologies], 2016, no. 4 (32), pp. 101-109. doi: 10.18324/2077-5415-2016-4-101-109. (In Russian)
7. Shi M., Wang J., Xu Y., Huang K., Li H., Wang P. Condition Monitoring of PWM Converter Based on Multiple Support Vector Machine Algorithm. 10<sup>th</sup> International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). IEEE, 2019. Pp. 264-268. doi: 10.1109/PEDG.2019.8807567.
8. Steklov A.S., Titov V.G., Serebryakov A.V. Expert systems for processing diagnostics results. *Nauchnyi almanakh*. [Scientific almanac], 2015, no. 10-3, pp. 247-250. (In Russian)
9. Saushev A.V. *Oblasti rabotosposobnosti elektrotekhnicheskikh sistem* [Working efficiency areas of electrical engineering systems]. St. Petersburg, Polytechnica Publ., 2013. 412p. (In Russian)
10. Serebryakov A.V., Steklov A.S., Titov V.G. *Monitoring i prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya avtonomnykh elektrotekhnicheskikh kompleksov* [Monitoring and forecasting technical condition of stand-alone electrical engineering complexes]. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev Publ., 2018. 174p. (In Russian)
11. Kochegarov D.M., Serebryakov A.V. Fuzzy logic apparatus to assess synchronous generator performance. *Energoeffektivnost i energobezopasnost proizvodstvennykh protsessov (EEPP-2019)* [Production processes energy efficiency and energy security (EEPP-2019)], Toliatty, Toliatty State University Publ., 2019, pp. 186-189. (In Russian)
12. Kochegarov D.M., Serebryakov A.V. Fuzzy logic system for assessment of frequency converter operating quality. *Intellectualnaya elektrotekhnika* [Smart Electrical Engineering], 2019, no. 4, pp. 27-34. (In Russian)
13. Kochegarov D.M., Serebryakov A.V. Fuzzy logic to assess photovoltaic panel performance. *Fedorovskie chteniya: materialy mezhdunarodnoy konferentsii* [International conference "Fedorov readings"]. Moscow, MPEI Publ. House, 2019, pp. 300-304. (In Russian)

Кочеганов Д.М., Серебряков А.В., Стеклов А.С. Имитационная модель солнечно-ветряной электростанции с нейро-нечеткой системой прогнозирования технического состояния // *Электротехнические системы и комплексы*. 2021. № 2(51). С. 68-75. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-68-75](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-68-75)

Kochegarov D.M., Serebryakov A.V., Steklov A.S. Simulation Model of a Wind-Solar Power Plant with a Technical Condition Neuro-Fuzzy Forecasting System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 2(51), pp. 68-75. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-68-75](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-68-75)