



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

ул. Московское шоссе, д. 34, г. Самара, 443086
Тел.: +7 (846) 335-18-26, факс: +7 (846) 335-18-36
Сайт: www.ssau.ru, e-mail: ssau@ssau.ru
ОКПО 02068410, ОГРН 1026301168310,
ИНН 6316000632, КПП 631601001

19 АВГ 2022 № 221-4129

На № _____ от _____

ОТЗЫВ ОППОНЕНТА

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию *Килина Григория Александровича*
на тему «Автоматизация испытаний систем управления
электроэнергетическими газотурбинными установками
с использованием нейросетевых моделей»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.3.3 - "Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами".**

1. Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 146 наименований и 11 приложений. Основное содержание работы изложено на 196 страницах (включает 119 рисунков и 20 таблиц). Объём и структура работы соответствуют требованиям "Положения о присуждении учёных степеней" к оформлению диссертаций. Изложение диссертации подчинено решению поставленной задачи.

2. Актуальность. Вопросы энергообеспеченности отдалённых и труднодоступных населённых пунктов, промышленных объектов, а также вопросы энергонезависимости ряда промышленных предприятий, сельскохозяйственных и медицинских организаций относятся к разряду стратегически важных для развития страны. Поскольку автономные энергоагрегаты, как правило, выполнены на базе конвертированных авиационных двигателей, т.е. объектов уже имеющих свою систему автоматического управления (САУ), то возникает проблема совместной настройки двух САУ – одной, отвечающей за работу газотурбинной установки (ГТУ), и другой – отве-

чающей за работу синхронного генератора (СГ). Проведение натуральных испытаний энергоагрегата для настройки его САУ затратно по времени, сопряжено с финансовыми потерями и неоправданным расходом ресурса ГТУ. Поэтому отработка и настройка САУ осуществляется на полунатурных стендах с использованием математической модели объекта управления. Однако быстроедействие полноразмерных, выполненных на базе дифференциальных уравнений, математических моделей ГТУ не удовлетворяет условию их синхронной работы с агрегатами системы управления. Такая медлительность полноразмерных моделей не позволяет проводить эксперименты в режиме реального времени. Для решения возникшей задачи широкое применение нашли быстрорешаемые регрессионные математические модели ГТУ. Поэтому в настоящее время важным является вопрос повышения точности таких моделей и снижения временных затрат на их составление. Автором предложен способ, который заключается в применении технологии искусственных нейронных сетей, для получения математических моделей идентификации ГТУ и СГ и последующего их использования для настройки САУ энергоустановки. Важность затрагиваемой автором проблемы, своевременность решения рассматриваемой научно-технической задачи и уникальность предложенных методик и математических моделей определяет актуальность диссертационной работы.

3. Основные результаты и научная новизна. Научную новизну работы определяет следующее. Килиным Г.А. разработана методика выбора и обоснования архитектуры и гиперпараметров искусственной нейронной сети, предназначенной для получения новых быстрорешаемых математических моделей газотурбинной энергоустановки (ГТЭС). Следует отметить, что использование полученных с помощью разработанной методики моделей значительно повысило достоверность расчёта различных режимов работы ГТЭС в сравнении с существующими быстрорешаемыми моделями, полученными идентификацией с помощью метода наименьших квадратов. Созданные модели автор использовал в методике автоматизации испытаний САУ электроэнергетическими ГТУ, при этом важно отметить, что разработанная методика автоматизации нашла практическую реализацию при разработке программно-моделирующего комплекса, также выполненной автором диссертации.

4. Достоверность разработанной методики создания нейросетевых моделей ГТЭС подтверждается результатами сравнения с экспериментальными данными испытаний ГТУ.

5. Теоретическая и практическая ценность. Научная и практическая ценность работы определяется разработанными: методикой автоматизации испытаний САУ электроэнергетическими ГТУ, позволившей сократить процедуру настройки САУ ГТУ; методикой выбора архитектуры и гиперпараметров искусственной нейросети, позволившей повысить точность моделировать различных режимов работы ГТЭС; программно-моделирующим комплексом, реализующим методику автоматизации испытаний САУ ГТЭС. Результаты работы внедрены в тех-

нологический процесс на ООО "НТЦ "Турбопневматик", область компетенции которого связана с разработкой семейства унифицированных многотопливных энергоустановок типа АВГЭМ мощностью 0,8 МВт ... 1,6 МВт на основе газотурбинных двигателей.

6. Апробация работы. Основные положения диссертации Килина Г.А. опубликованы в достаточном количестве публикаций: 17 в научных журналах из перечня ВАК, девять - в изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus, имеется четыре свидетельства о регистрации программы для ЭВМ. Поэтому считаю, что диссертация Килина Г.А. в достаточной степени апробирована.

7. Автореферат полностью соответствует диссертации. Существенных замечаний по оформлению как автореферата, так и диссертации нет. Стил ь изложения работы чёткий, строгий, диссертация написана ясным языком, на высоком научном уровне.

8. Достоинства и недостатки диссертации. К достоинствам диссертации можно отнести строгость физического и математического моделирования процессов в САУ ГТЭС. Недостатков, ставящих под сомнение справедливость какого-либо результата не обнаружено. Все замечания по диссертации можно квалифицировать как по оформлению, так и по существу работы.

Замечания по существу следующие.

1. В работе предложен новый математический аппарат, позволяющий осуществлять совместную настройку САУ ГТУ и САУ СГ. Это неоспоримое преимущество по сравнению с существующими способами разработки и настройки САУ, которое необходимо демонстрировать. Однако автором не приводится сравнение результатов настройки при помощи, разработанной нейросетевой модели, с результатами настройки при помощи, критикуемого им, существующего способа. В частности, было бы убедительно увидеть такое сравнение, когда настройка с помощью существующих методов приводила бы к аварийной ситуации (ситуация, описываемая в диссертации на стр. 19) и как её удаётся избежать при настройке с помощью разработанной автором методики испытаний.

2. Действительно включение ГТУ в единую энергосеть вызывает большое сопротивление у эксплуатирующих организаций, поскольку переходный процесс в такой установке недопустимо долгий при условиях, когда дефицит мощности при аварийном отключении должен быть быстро скомпенсирован. Поэтому, как справедливо отмечает автор, ГТУ нашли применение в качестве независимых от общей сети генерирующих электроэнергию станций (стр. 7 диссертации). Однако, как одно из преимуществ разработанной методики, автор показывает её возможность уменьшить время переходного процесса скорости вращения свободной турбины с 19 с до 14 с. При этом не указывается требуемое время переходного процесса. Понятно, что достигнутые 14 с для работы ГТУ в единой сети – всё равно чрезмерно долго, но так ли это критично иметь не 19 с, а 14 с при изолированной работе ГТУ, обслуживающей, например, какой-

либо промышленный объект. Поэтому в этом оценить достоинство, предлагаемой методики достаточно сложно.

3. САУ ГТУ помимо контура с ПИ-регулятором частоты ротора включает в себя множество контуров ограничений, например, по полной температуре в камере сгорания, ограничения ускорения ротора для исключения помажных режимов. Кроме этого, по причине нелинейных свойств двигателя как объекта управления, коэффициенты самого ПИ-регулятора меняются при разгоне или торможении двигателя. Постоянными они могут быть только при работе в районе некоторого режима при небольшом отклонении управляющих или возмущающих воздействий. Однако, в работе рассматривается процесс настройки регулятора с постоянными коэффициентами при существенном изменении мощности нагрузки с 1000 кВт до 6000 кВт, что никак нельзя рассматривать некоторой окрестностью одного режима с неизменными динамическими свойствами ГТУ. Значит постоянство (пусть и более приемлемо подобранных) коэффициентов регулятора при таком существенном изменении возмущающего воздействия принимать было бы не совсем справедливо при повышении точности регулирования САУ.

4. В диссертации говорится о том, что при испытаниях САУ ГТУ в настоящее время не учитываются разнообразные режимы работы ГТЭС, которые типичны для их эксплуатации (стр. 8), но далее подробно не говорится о каких режимах идёт речь, не указывается почему именно на них нужно обращать внимание.

5. Целью работы является повышение процесса эффективности испытаний САУ ГТУ. Однако нигде не говорится о том, что понимается под эффективностью процесса испытаний. Время? Возможность рассмотреть разнообразные режимы? Требуется явно указать.

6. В практической ценности работы указывается, что разработанная система автоматизации испытаний позволяет повысить устойчивость электроэнергетической системы за счёт повышения качества выработки электроэнергии. Не ясно, что понимается под устойчивостью электроэнергетической системы. Если имеется в виду устойчивость как свойство системы управления, то повысить её нельзя. Можно только увеличить запас устойчивости. И уж тем более повысить запас устойчивости за счёт улучшения показателей качества управления нельзя. Формулировка требует разъяснения.

7. Автор несколько неточно применяет некоторые формулировки. Например, как указано на стр. 22 диссертации вторым этапом настройки системы управления является определение точки, удовлетворяющей требованию минимума выбранной оценки точности. Скорее речь идёт или о максимуме оценки точности, или о минимуме погрешности. Или в тексте отмечено, что на рис. 3.8 и 3.9 проводится сравнение модельных и экспериментальных данных. Уместнее было бы указать не экспериментальных данных, а данных вычислительного эксперимента.

8. Автор обосновано подходит к выбору архитектуры нейросети и её гиперпараметров, но причины выбора некоторых параметров моделирования остаются неясными. Например, на стр. 80 почему для получения коэффициентов уравнений регрессии использовались именно указанные 10 ступеней изменений расхода топлива? Почему при ступенчатом изменении расхода топлива его значение всегда начиналось с 608 кг/час, а не переходило на новый уровень с предыдущего.

9. Методика получения экспериментальных данных (стр. 125 в разделе 3.7) носит декларативный характер, поскольку в ней приведены общие схемы и формулировки. Указаны основные этапы методики, однако не раскрывается их суть. Например, п. 6 – изменение управляющих и возмущающих воздействий в выбранном диапазоне для получения репрезентативного эксперимента, а какое это изменение, по какому закону, или, например, п.7 – сохранение необходимого количества экспериментальных данных, а какого количества и почему именно такое количество необходимо.

К замечаниям по оформлению работы можно отнести следующие.

10. В диссертации имеется ряд описок и неточностей. На стр. 13 в нумерованном списке после точки в порядковом номере списка предложение начинается со строчной буквы, хотя после точки следующее слово должно начинаться с прописной буквы. По этой же причине слова "На защиту выносятся" следует заканчивать не двоеточием, а точкой. На стр. 27 на седьмой строчке – описка "о7бразца". На стр. 29 в формулах при обозначении напряжение обмотки используется строчная буква f , а в расшифровке обозначений прописная F . На стр. 32 предложение заканчивается формулой (1.12), однако точка в конце предложения не поставлена. На рис. 2.7 – нет обозначения линии связи блоков "Экспериментальные данные с объекта" и "Блок сравнения данных". На стр. 79 "доплива" – описка.

11. На стр. 29 указано, что матрица коэффициентов A – квадратная и имеет размерность $n \times n$. Однако при этом она строится для пяти уравнений с семью слагаемыми в правой части и по смыслу имеет размерность 5×7 .

12. На стр. 66 ΔK_u – как правило запас не гидродинамической, а газодинамической устойчивости компрессора.

13. На стр. 30 указано, что в источниках [36-39] говорится о распознавании изображений, а в [41-43, 48, 49, 50] говорится о ИНС математических моделях ГТУ. Хотя, когда говорится о распознавании изображений следует ссылаться на источники [41-43, 48, 49, 50], а о математических моделях ГТУ говорится в источниках [36-39].

14. Автореферат напечатан объёмом 1,5 п.л, однако в положении о присуждении учёных степеней п. 25: по диссертациям, принятым к защите, должен быть напечатан автореферат объёмом до 1 авторского листа для диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук.

11. Согласно ГОСТ 7.0.11-2011 п. 5.3.2 основной текст должен быть разделён на главы и параграфы или разделы и подразделы. Однако автор использует терминологию: и главы, и разделы одновременно (стр. 161 диссертации).

Несомненно, эти недостатки носят исключительно частный характер и ни в коем случае не влияют на основные результаты, полученные автором, не снижают научной новизны и практической ценности работы и никак не влияют на положительную оценку работы Килина Г.А.

9. Мнение о работе в целом. В целом, диссертация Килина Г.А., представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу, в которой содержится решение важной научно-технической задачи повышения эффективности испытаний САУ ГТУ за счёт применения нейросетевых моделей ГТЭС. Полученные результаты и выводы достоверны и обоснованы.

Считаю, что оппонируемая диссертационная работа Килина Г.А. "Автоматизация испытаний систем управления электроэнергетическими газотурбинными установками с использованием нейросетевых моделей" является завершённым научным исследованием, выполненным на высоком научно-методическом уровне, соответствует специальности 2.3.3 – "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами". Отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор – Килин Григорий Александрович, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент:

заведующий кафедрой эксплуатации авиационной техники,
профессор кафедры автоматических систем энергетических
установок федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева» (Самарский университет),
доктор технических наук

Г.М. Макарьянц

Макарьянц Георгий Михайлович,
443086, г. Самара, Московское шоссе, 34, Самарский университет,
+7 (846) 267-46-13, +7 (846) 334-56-83, makaryants@ssau.ru



подпись Г.М. Макарьянц
содержит
Самарского университета
Васильева И.И.