

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОМАШИННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Гизатуллин Ф.А.¹, Каримов В.И.¹

¹ *ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет Министерства образования и науки РФ», Уфа Россия (450000, Уфа, ул. К. Маркса, 12), e-mail: jam1986@inbox.ru*

В статье рассмотрены результаты экспериментальных исследований генератора, входящего в состав электромашинного преобразователя, проведенных для подтверждения адекватности разработанных моделей и оценки поведения бесконтактного синхронного генератора с разработанными регуляторами частоты выходного напряжения с использованием нечеткой логики и нейронной сети в статических и динамических режимах работы. Приведена структурная схема разработанной лабораторной установки, позволяющей исследовать систему регулирования частоты выходного напряжения ЭМП, и дано описание лабораторной установки. Приведены графики переходных процессов изменения частоты выходного напряжения генератора, при подключении номинальной нагрузки к зажимам генератора с применением интеллектуальных регуляторов. Представлены результаты экспериментальных исследований при внезапном подключении нагрузки к генератору ЭМП. Показано, что интеллектуальные регуляторы частоты выходного напряжения синхронных генераторов превосходят штатный регулятор по точности, величине максимального отклонения и времени регулирования.

Ключевые слова: бесконтактный синхронный генератор, регулятор частоты, интеллектуальные системы регулирования.

EXPERIMENTAL STUDY OF OUTPUT VOLTAGE FREQUENCY INTELLECTUAL CONTROL SYSTEMS OF THE SYNCHRONOUS GENERATOR AS PART OF THE ROTARY CONVERTER

Gizatullin F.A.¹, Karimov V.I.¹

¹ *Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia (450000, Ufa, street K. Marksa, 12), e-mail: jam1986@inbox.ru*

The results of experimental studies of the generator, which is part of the rotary converter, conducted to confirm the adequacy of the developed models and assess the behavior of contactless synchronous generator with designed output voltage frequency regulators based on fuzzy logic and neural networks in static and dynamic modes are given. The block diagram of the developed laboratory stand, allowing studying of the output voltage frequency regulation system of rotary converter, and a description of the laboratory stand are given. The graphs of transient changes in the output voltage frequency of the generator at rated load with the use of intelligent controllers are presented. The results of experimental studies with a sudden load that is connected to the rotary converter generator are given. It is shown that the intellectual output voltage frequency controllers of synchronous generators are greater than regular controllers in accuracy, maximum deflection and transient time.

Key words: contactless synchronous generator, frequency controller, intelligent control systems.

К системам регулирования авиационного электромашинного преобразователя (ЭМП) предъявляется ряд требований к допустимым колебаниям частоты, времени переходного процесса и величине провалов и выбросов при изменении нагрузки. Для повышения качества регулирования частоты ЭМП в динамических режимах представляет интерес использование интеллектуальных алгоритмов управления.

В работах [1] и [2] были разработаны модели интеллектуальных систем регулирования частоты выходного напряжения бесконтактного магнитоэлектрического синхронного генератора, входящего в состав электромашинного преобразователя ПТ-500ЦБ, на основе

нечеткой логики и нейронной сети. Для подтверждения адекватности разработанных моделей и оценки поведения бесконтактного синхронного генератора с разработанными регуляторами частоты выходного напряжения, с использованием нечеткой логики и нейронной сети в статических и динамических режимах работы, необходимо провести экспериментальные исследования генератора, входящего в состав ПТ-500ЦБ.

Разработанный в [1] интеллектуальный регулятор частоты на основе нейронной сети имеет 3 входа – значения частоты вторичного напряжения ЭМП, тока нагрузки и скорости изменения частоты и 1 выход – значение тока управляющей обмотки двигателя ЭМП. Нейросетевой регулятор частоты представляет собой трехслойную сеть обратного распространения, включающую 3 нейрона во входном слое (по числу компонент входного вектора) с передаточной функцией *logsig*, 25 нейронов во втором слое с передаточной функцией *logsig* и 1 нейрон в выходном слое (по числу компонент выходного вектора) с передаточной функцией *purelin*. При этом в качестве обучающего алгоритма выбран алгоритм *Levenberg-Marquardt (trainlm)*. Критерием окончания обучения является значение отклонения, при котором обучение будет считаться законченным. Это значение было выбрано равным 0.01. Максимальное количество циклов обучения – 1000.

При использовании в качестве входных переменных нескольких величин получение обучающей выборки является трудно формализуемой задачей и обычно проводится методом проб и ошибок. В работе [1] предлагается более технологичный способ получения обучающей выборки на основе алгоритма глобальной оптимизации (генетического алгоритма). Решением для этого алгоритма является вектор эталонов нейронной сети, при котором функция приспособленности достигает минимального значения. Эта функция производит расчет суммы статической ошибки, провалов и выбросов частоты и времени регулирования частоты. Таким образом, алгоритм производит поиск такого вектора эталонов нейронной сети, чтобы при применении для обучения нейросетевого регулятора этого вектора сумма статической ошибки, провалов и выбросов частоты и времени регулирования частоты была минимальной.

Найденный с помощью генетического алгоритма оптимальный вектор эталонов T был использован для обучения нейронной сети, на основе которой построен регулятор частоты ЭМП.

Разработанный в [2] нечеткий регулятор частоты, так же как и предыдущий регулятор, имеет 3 входа – значения частоты вторичного напряжения ЭМП, тока нагрузки и скорости изменения частоты и 1 выход – значение тока управляющей обмотки двигателя ЭМП. Для формирования нечеткого регулятора частоты определены входные и выходные лингвистические переменные и вид функций принадлежности. Входная лингвистическая

переменная «Частота вторичного напряжения» имеет 7 термов, входная переменная «Ток нагрузки» – 5, входная переменная «Скорость изменения частоты вторичного напряжения» – 5, выходная переменная «Ток управляющей обмотки двигателя ЭМП» – 30. Формализация термов реализована с помощью треугольной функции принадлежности (*trimf*). База правил содержит 175 правил вида «ЕСЛИ x_1 есть A_1 и x_2 есть A_2 и x_3 есть A_3 ТО y есть B », где x_1, x_2, x_3 – входные переменные; y – выход регулятора; A_1, A_2, A_3, B – лингвистические значения переменных.

Для того, чтобы нечеткий регулятор частоты обеспечивал наилучшие показатели качества регулирования, была произведена оптимизация параметров регулятора. Для решения задачи оптимизации был разработан метод на основе генетического алгоритма. Разработанный в [2] метод оптимизации характеристик регулятора на основе нечеткой логики заключается в том, что решение алгоритма кодируется в виде вектора параметров нечеткого регулятора. Функция приспособленности производит расчет суммы статической ошибки, провалов и выбросов частоты и времени регулирования частоты. Таким образом, алгоритм производит поиск такого вектора, чтобы система регулирования на основе нечеткой логики обеспечивала минимальную сумму статической ошибки, провалов и выбросов частоты и времени регулирования частоты.

На рис. 1 представлена структурная схема разработанной лабораторной установки, позволяющей исследовать систему регулирования частоты выходного напряжения ЭМП. Лабораторная установка включает в себя ЭМП, включенный на напряжение 27 В, которое создается на выходе выпрямителя В, нагрузку R16, подключаемую к зажимам генератора ЭМП с помощью ключа К1, и систему регулирования частоты. Выпрямитель подключен к источнику трехфазного напряжения 380 В. Система регулирования включает в себя: компьютер с установленной средой *Matlab*, в которой производится программная эмуляция комбинированной системы регулирования частоты с элементами искусственного интеллекта (нечеткая логика, нейронная сеть), измерительный орган частоты ИОЧ, датчик тока ДТ, фильтры нижних частот на R9, C9, R10 и C10, транзистор VT1 в цепи обмотки возбуждения двигателя ЭМП, интерфейс передачи данных между компьютером и ЭМП на основе макетной платы *AVR-USB-MEGA16*. Измерительный орган частоты и датчик тока выполнены на делителях напряжения.

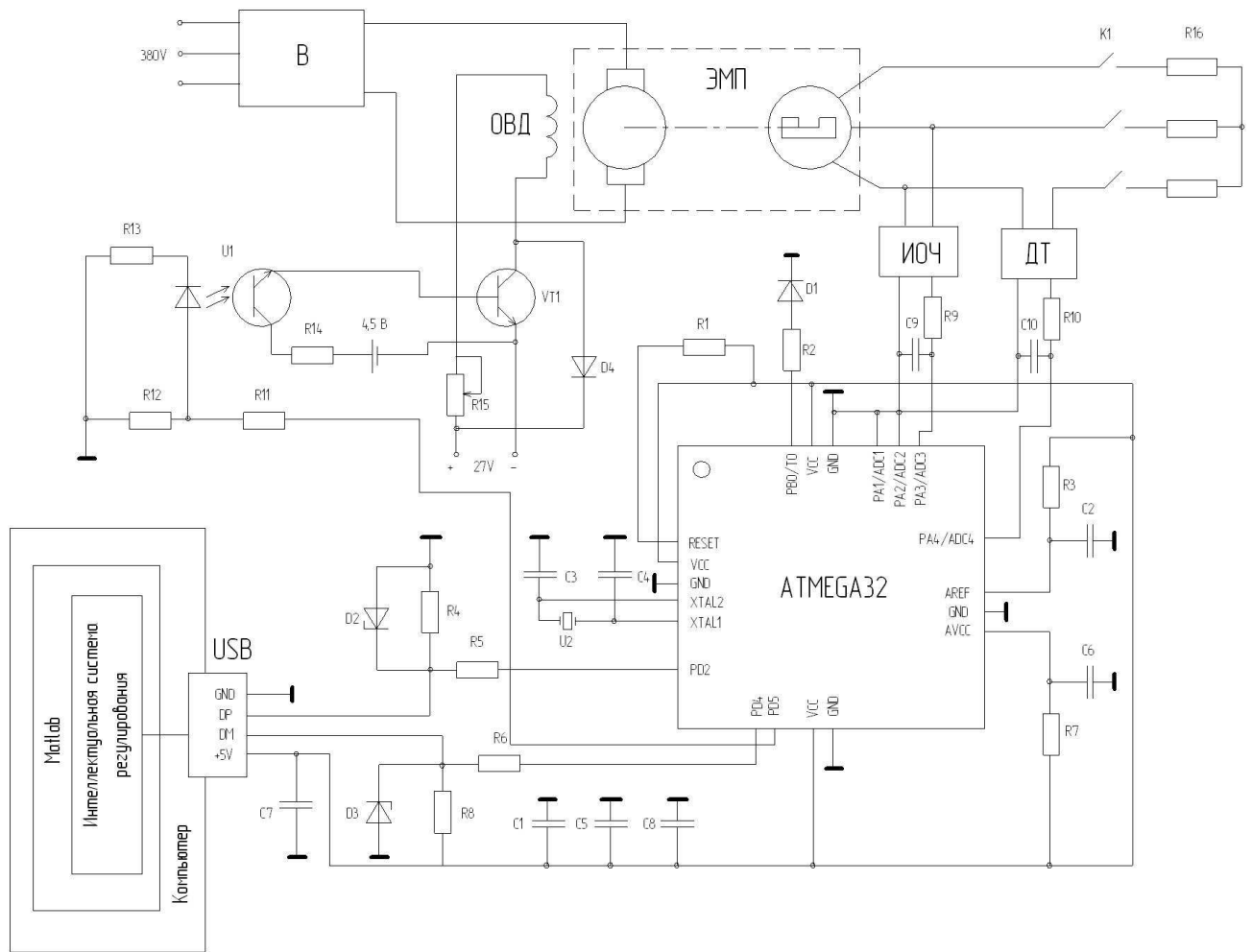


Рис. 1. Схема лабораторной установки

Макетная плата *AVR-USB-MEGA16* спроектирована для быстрой разработки низкоскоростных устройств *USB* на микроконтроллере *ATmega32*, при этом протокол *USB* реализован программно, без использования дополнительных специализированных чипов. Это решение хорошо подходит для проектирования таких периферийных устройств для компьютера, которые не требуют высоких скоростей обмена по шине *USB* (подключение датчиков, устройств ввода, специализированных программаторов для чипов). Программная реализация протокола *USB* значительно упрощает принципиальную схему и снижает стоимость устройства в целом. Имеются простые примеры работающих устройств (*USB HID* – управление портами, передача данных) [3].

Программа, прошиваемая в микроконтроллер *ATmega32*, производит считывание результатов аналого-цифрового преобразования двух входных сигналов при подаче на микроконтроллер управляющего запроса на чтение данных и устанавливает необходимое значение коэффициента заполнения импульсов на одном из выводов микроконтроллера при подаче управляющего запроса на запись данных.

Для обмена данными с компьютером, к которому подключается макетная плата, разработан алгоритм на языке Си на основе библиотеки *libusb*. В первой части алгоритма

производится поиск *USB*-устройства и возвращается его идентификатор. В основной части алгоритма производится отправка запроса на получение данных с *USB*-устройства (результатов аналого-цифрового преобразования) либо на запись данных в *USB*-устройство (значения коэффициента заполнения). В заключительной части происходит закрытие *USB*-устройства [5].

Поскольку алгоритмы регулирования частоты выходного напряжения синхронного генератора реализованы в среде *Matlab*, возникла необходимость написания модулей расширения языка *Matlab* (*MEX*-файлов) для выполнения описанных выше функций. В модулях-расширениях *Matlab* для обмена параметрами всех типов с вычислительной средой *Matlab* используется только одна структура – *mxArray*. Все типы данных *Matlab* – массивы, скаляры, строки, клеточные и многомерные массивы, объекты и т.п. выражаются при помощи этой единственной структуры. В программном интерфейсе создаваемой динамической библиотеки должна быть обязательно экспортирована единственная функция с двумя параметрами – входным массивом структур *mxArray* и выходным массивом структур *mxArray*. Соответственно, задача модуля расширения заключается в том, чтобы на основе входной информации создать выходной массив. *Matlab* содержит специальную библиотеку вспомогательных функций, облегчающую работу с тем или иным типом данных внутри расширения *Matlab*. Сборка (компиляция, связывание и т.п.) модулей производилась из среды *Matlab* – при помощи команды *MEX* [4].

В среде *Matlab* создан алгоритм, который циклически обрабатывает сигналы с двухканального АЦП, вычисляет выходной сигнал нейронной сети или системы нечеткого вывода и выдает задающее воздействие на обмотку возбуждения двигателя ЭМП. При этом производится запись всех текущих значений входных и выходных параметров регулятора для последующей обработки. Таким образом, обеспечивается заданный уровень частоты выходного напряжения ЭМП.

На рис. 2 приведены графики переходных процессов изменения частоты выходного напряжения генератора, при подключении номинальной нагрузки к зажимам генератора с применением интеллектуальных регуляторов. На рис. 2 Δf – провал частоты, t – время переходного процесса регулирования частоты. Из рисунка видно, что при использовании интеллектуальных регуляторов провалы частоты не превышают 10 Гц, время регулирования составляет 0,6 с, причем нейросетевой регулятор обеспечивает меньший провал частоты.

Результаты экспериментальных исследований при внезапном подключении нагрузки, равной 0,25, 0,5, 0,75 и 1 номинальной, приведены в табл. 1. Номинальный ток нагрузки преобразователя ПТ-500ЦБ составляет 8А. Подключение различных величин нагрузки к зажимам генератора производилось с помощью реостата.

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет сделать вывод о том, что при подключении нагрузки нечеткий регулятор позволяет уменьшить провалы частоты в среднем в 1,7 раза, нейросетевой регулятор – в среднем в 3,3 раза по сравнению со штатным регулятором.

В переходных процессах быстродействие нечеткого регулятора превышает быстродействие штатного в среднем в 1,5 раза, быстродействие нейросетевого регулятора превышает быстродействие штатного в среднем в 1,84 раза.

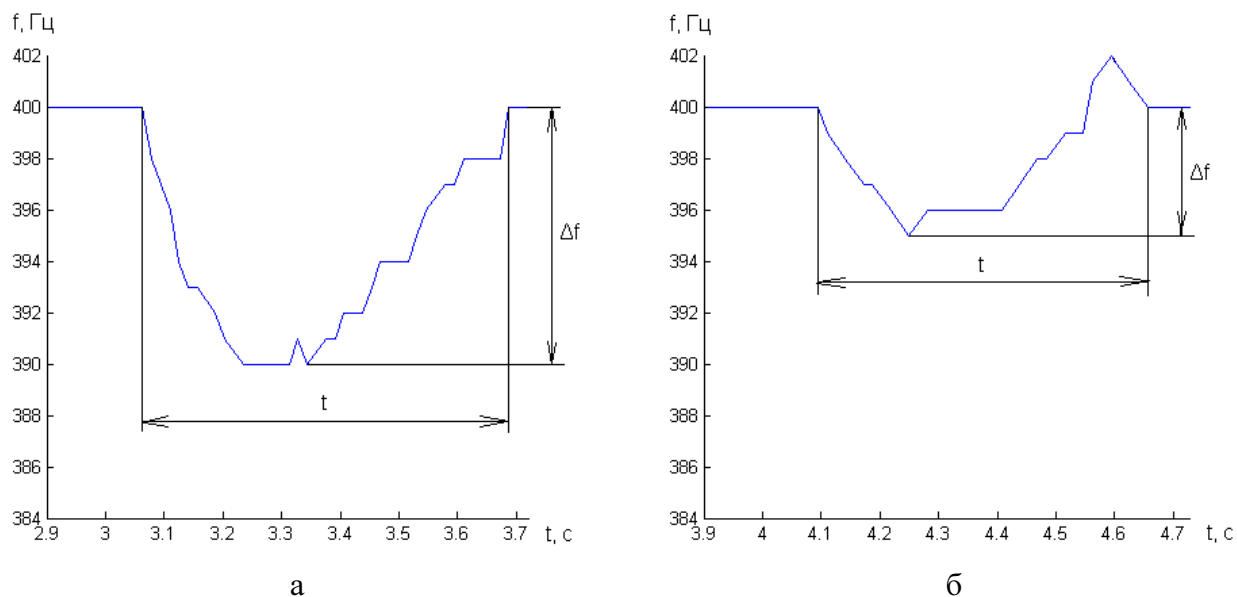


Рис. 2. Графики частоты выходного напряжения генератора при подключении номинальной нагрузки: а – с применением нечеткого регулятора; б – с применением нейросетевого регулятора

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований интеллектуальных систем регулирования частоты

I, о.е.	нечеткий регулятор			нейросетевой регулятор			штатный регулятор		
	$f_{уст}$, Гц	Δf , Гц	t, с	$f_{уст}$, Гц	Δf , Гц	t, с	$f_{уст}$, Гц	Δf , Гц	t, с
0,25	400	2	0,781	400	2	0,547	400	2	1,156
0,5	400	5	0,734	400	3	0,578	394	9	0,937
0,75	400	8	0,656	399	3	0,591	386	15	1,328
1	399	10	0,656	399	5	0,561	382	21	0,781

Сравнение результатов экспериментов с результатами моделирования процессов регулирования частоты в статических режимах работы [1] показало, что расхождение между экспериментальными данными и результатами моделирования не превышает 10–15 %, что подтверждает достоверность разработанных математических моделей.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований показали, что интеллектуальные регуляторы частоты выходного напряжения синхронных генераторов превосходят штатный регулятор по точности, величине максимального отклонения и времени регулирования, что подтверждает перспективность их применения.

Список литературы

1. Каримов В. И. Моделирование интеллектуальных систем регулирования частоты электромашинного преобразователя в динамических режимах // Актуальные проблемы науки и техники. Том 2. Машиностроение, электроника, приборостроение, управление и экономика: Сборник трудов Шестой Всероссийской школы-семинара аспирантов и молодых ученых, 15–18 февраля 2011 г. / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. –Уфа: УГАТУ, 2011. – С. 72-75.
2. Каримов В. И. Моделирование динамических режимов работы нечеткого регулятора частоты электромашинного преобразователя // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция: сб. тр.: В 5 т. Т. 2 / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2011. – С. 29-31.
3. Макетная плата AVR-USB-MEGA16 [Электронный ресурс]. URL: <http://microsin.ru/content/view/605/44/>.
4. Написание расширений MATLAB на языке C [Электронный ресурс]. URL: <http://matlab.ucoz.ru/publ/6-1-0-10>.
5. Разработка устройства USB – как начать работу с библиотеками AVR USB (V-USB) и libusb [Электронный ресурс]. URL: <http://microsin.ru/content/view/613/44/>.

Рецензенты:

Рогинская Любовь Эммануиловна, д.т.н., профессор кафедры «Электромеханика» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет Министерства образования и науки РФ», г. Уфа.

Хайруллин Ирек Ханифович, д.т.н., профессор кафедры «Электромеханика» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет Министерства образования и науки РФ», г. Уфа.