

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И СИНТЕЗ НЕЛИНЕЙНОГО РЕГУЛЯТОРА МАЛОРАЗМЕРНОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Кузнецов А.В,
Макарьянц Г.М.

Самарский национальный
исследовательский университет
имени С.П. Королёва
ул. Московское шоссе, д. 34, г.
Самара, 443086
a.v.kuznetsov91@mail.ru

В последнее время для моделирования динамики газотурбинных двигателей и синтеза регуляторов используют нейронные сети. Однако достаточно малое внимание уделено рационализации структуры нейронной сети для задач идентификации. Кроме того, нейронные сети в управлении часто применяют либо для подстройки коэффициентов ПИД-регуляторов, либо для управления на определённых режимах. Поэтому важными задачами являются исследование зависимости структуры нейронной сети от моделируемого параметра двигателя и синтез нейроконтроллера для управления двигателем во всём диапазоне режимов. Было проведено исследование структуры нейронной сети для моделирования частоты вращения ротора на основе испытаний двигателя. В результате была получена модель двигателя JetCat P-60 SE, для которого был синтезирован нейроконтроллер с учётом ограничений двигателя по расходу топлива. Полученные результаты позволяют сократить общее время, затрачиваемое на моделирование и синтез нелинейной системы управления газотурбинного двигателя.

Ключевые слова. Газотурбинный двигатель; идентификация; нелинейная модель; нейроконтроллер; нейронные сети

1 Введение

Для обеспечения качественной работы системы автоматического управления (САУ) газотурбинного двигателя необходима точная математическая модель его динамических процессов [1-5]. В последнее время значительный интерес многих авторов [6-11] вызывает использование моделей объектов в контуре системы управления. Одним из важнейших параметров работы таких моделей, работающих совместно с системой управления, является их вычислительная сложность. Это связано с тем, что расчёт контролируемых переменных должен выполняться параллельно с процессами, происходящими в двигателе, а они достаточно быстротечны и лежат в диапазоне частот от 0,01 Гц до 500 Гц [12]. Таким образом, применение традиционной математической модели, составленной из дифференциальных уравнений, описывающих физические

процессы в двигателе, вызывает серьёзные затруднения. Это связано с недопустимо большими временными затратами на реализацию итерационного процесса численного решения дифференциальных уравнений математической модели двигателя. Поэтому важной проблемой при разработке математических моделей, описывающих динамику ГТД, является повышение скорости расчётов при её использовании.

Другим фактором, влияющим на точность работы системы управления, является нелинейность объектов управления. Достаточно широкое распространение получили линейные регуляторы, однако они достаточно хорошо работают только для тех точек нелинейной характеристики, для которых они были настроены. Применение нелинейных регуляторов обеспечивает предсказуемое поведение сложных нелинейных объектов, к которым относятся газотурбинные двигатели, и позволяет

получить требуемую динамику и точность системы во всём диапазоне режимов работы двигателя [13]. В связи с этим, разработка нелинейных систем управления является актуальной задачей в течение последних нескольких десятилетий [14-16]. В связи с ужесточением требований ко времени создания всего двигателя важной задачей так же является сокращение времени разработки нелинейных систем управления.

2 Идентификация динамических характеристик объекта управления

Для идентификации динамических характеристик частоты вращения ротора малоразмерного газотурбинного двигателя использовалась NARX нейронная сеть с одним входом, одним выходом, одним скрытым слоем и единичной задержкой.

NARX сеть представляет собой персептрон с обратными связями из выходного слоя. Отличительной особенностью этого типа сетей является возможность использования различного количества задержек сигнала как из выходного слоя во входной, так и задержки во входном векторе. При этом количество элементов входного вектора и вектора обратной связи увеличивается пропорционально количеству задержек. Это позволяет моделировать более сложные зависимости. Однако, частота вращения ротора напрямую зависит от расхода топлива, что отражено в дроссельной характеристике двигателя, показанной на рисунке 1 сплошной линией. Поэтому было принято решение использовать единичные задержки на входе и выходе и варьировать только количество нейронов в скрытом слое.

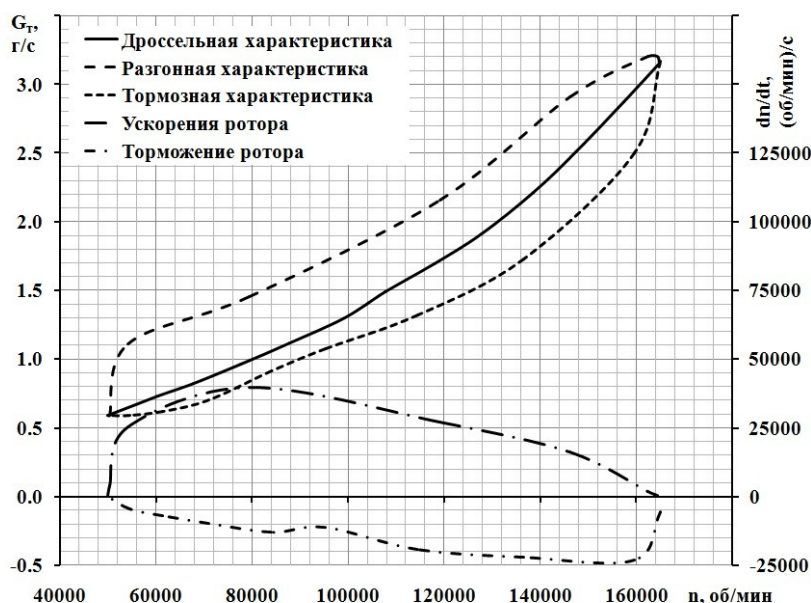


Рисунок 1. Динамическая характеристика двигателя

В качестве обучающей выборки был взят набор данных, полученных в результате испытаний двигателя и представляющих собой зависимость расхода топлива и частоты вращения ротора двигателя от времени. Так как весовым коэффициентам нейронов в начальный момент времени

присваивается случайное значение в определенном диапазоне, то было проведено 15 таких запусков с целью определения распределения точности полученной модели в зависимости от количества нейронов. Результаты этих вычислений представлены на рисунке 2.

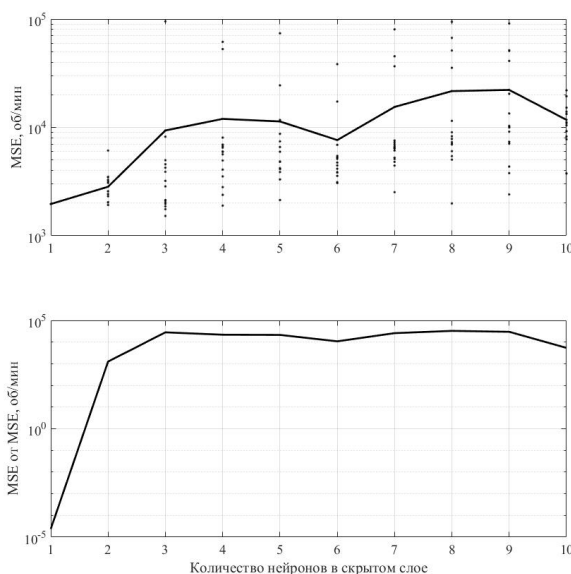


Рисунок 2. Зависимость точности идентификации от количества скрытых нейронов

Из рисунка 2 можно сделать вывод, что наилучшими характеристиками по точности обладает сеть, у которой один нейрон в скрытом слое, так как она характеризуется наименьшим среднеквадратичным отклонением от результатов эксперимента, а также наименьшим разбросом по отклонениям при каждом запуске. На

рисунке 3 изображён переходных процесс двигателя и полученной нейросетевой модели (сверху) и величина ошибки между моделью и двигателем (снизу). Средняя ошибка полученной модели по времени моделирования составила 0,9529%.

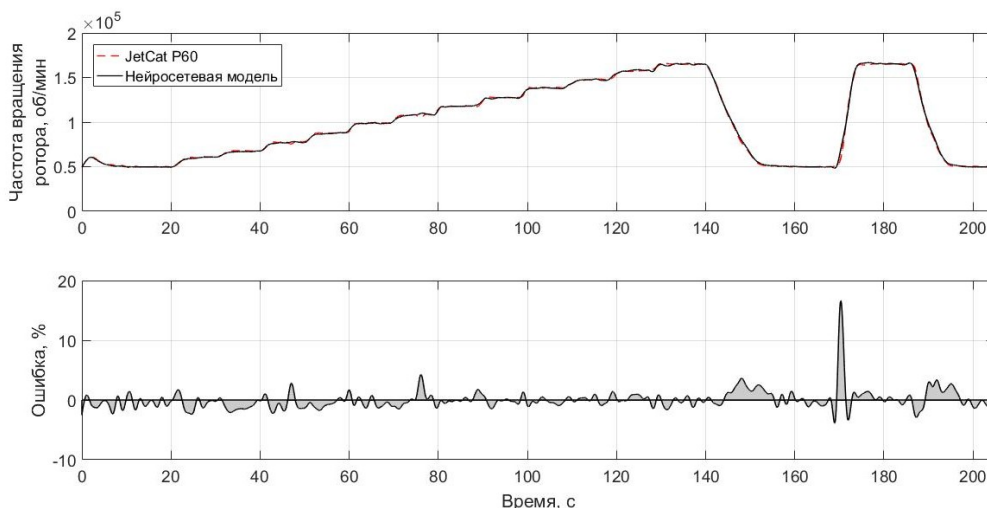


Рисунок 3. Результаты идентификации

3 Синтез нейроконтроллера

Нейроконтроллер представляет собой нейронную сеть прямого распространения с

одним скрытым слоем. Такая сеть была выбрана из-за возможности аппроксимировать любые зависимости

между входом и выходом, варьируя число скрытых нейронов [17].

Нейронная сеть имеет три входа: ошибка, интеграл ошибки и значение уставки; и один выход – расход топлива. Скрытый слой содержит 10 нейронов. Во входной и скрытый слой были добавлены смещения, представляющие собой добавочные нейроны на которых всегда присутствует значение, равное 1. Нейроны входного слоя, скрытого и выходного соединены матрицами. В первоначальный момент времени эти матрицы инициализируются случайными числами из интервала от -0,5 до 0,5, а затем в процессе обучения значения в матрицах подбираются так, чтобы выходное значение нейронной сети максимально близко соответствовало целевому значению.

Вычисление текущей ошибки рассогласования вычисляется на основании расположения в данный момент величины расхода топлива относительно его верхнего и нижнего значения (рис. 1). Если расход топлива лежит в допустимых пределах, то величина рассогласования остаётся неизменной и равной разности между уставкой и текущим значением частоты вращения, вычисленным в модели двигателя. Если значение расхода топлива больше максимально допустимого для данной частоты вращения, то алгоритм рассчитывает ошибку исходя из того, на сколько было превышено допустимое значение:

$$err = err_n + \frac{G - G_{mean}}{G_{max} - G_{mean}} |err_n|,$$

$$err = n_t - n_f,$$

$$G_{mean} = \frac{G_{max} + G_{min}}{2},$$

где err – значение рассогласования для обучения нейронной сети; err_n – значение рассогласования между уставкой и фактической частотой вращения; n_t – уставка; n_f – фактическая частота вращения; G – текущий расход топлива.

Если расход топлива меньше, чем минимально допустимый, то рассогласование вычисляется по следующей формуле:

$$err = err_n - \frac{G - G_{mean}}{G_{max} - G_{mean}} |err_n|.$$

Обучение нейронной сети проводится циклически – сначала производится симуляция системы регулятор-объект.

Следующим шагом производится коррекция весов, используя модифицированные значения ошибок. Затем симуляция повторяется снова. Цикл прерывается, когда среднеквадратичное значение ошибки не станет меньшим, либо равным установленному значению.

В результате обучения нейроконтроллера были получены графики переходных процессов, а так же линия рабочих режимов на динамической характеристике двигателя (рисунок 4).

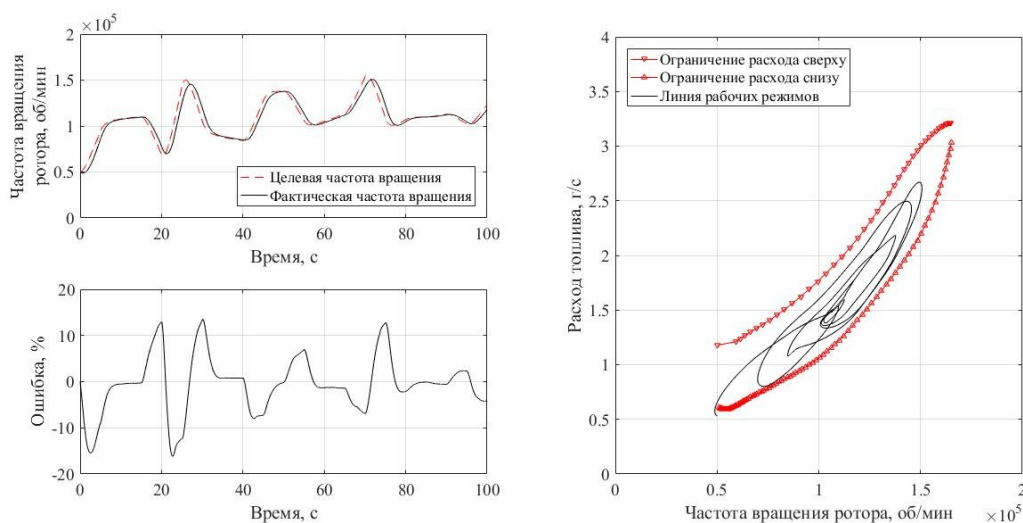


Рисунок 4. Результаты обучения нейроконтроллера

4 Заключение

В статье были показаны результаты исследования, посвящённого определению количества скрытых нейронов в сети, имитирующей зависимость частоты вращения ротора от расхода топлива для малоразмерного газотурбинного двигателя. Исследование показало, что наибольшую точность имеет нейронная сеть с одним нейроном в скрытом слое. При этом погрешность идентификации составила 0,9529%. Затем полученная модель использовалась для синтеза нейроконтроллера частоты вращения ротора двигателя. Обучение проводилось с учётом ограничений по расходу топлива. Полученные результаты позволяют сократить время идентификации динамики частоты вращения ротора газотурбинного двигателя, а так же синтезировать нелинейный регулятор с требуемыми ограничениями по расходу топлива.

Список использованных источников

[1] Camporeale S. M. Non-linear simulation model and multivariable control of a regenerative single shaft gas turbine / S. M. Camporeale, B. Fortunato, A. Dumas // IEEE Conference on Control Applications. Proceedings. -1997. - P. 721-723.

[2] Traverso A. Transient analysis of and control system for advanced cycles based on micro gas turbine technology / A. Traverso, F. Calzolari, A. Massardo // American Society of Mechanical Engineers, International Gas Turbine Institute, Turbo Expo (Publication) IGTI. - 2003. - Vol. 3. - P. 201-209.

[3] Cuevas L. C. Application of neurofuzzy speed and load control for gas turbine power units / L. C. Cuevas, S. D. L. Jayme, J. A. P. Reyes, J. A. L. Ciseña // 19th Annual Joint ISA POWID/EPRI Controls and Instrumentation Conference and 52nd ISA POWID Symposium. - 2009. – Vol. 477. - P. 352-366.

[4] Stöbel M. Rotating stall inception inside the low pressure compressor of a twin-spool turbofan engine / M. Stöbel, S. B. indl, R. Niehuis // Proceedings of the ASME Turbo Expo. - 2013. - Vol. 6A.

[5] Montazeri-Gh M. Hardware-in-the-Loop Simulation of Two-Shaft Gas Turbine Engine's Electronic Control Unit / M. Montazeri-Gh, S. Abyaneh, S. Kazemnejad // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and

Control Engineering. - 2016. - Vol. 230. – Issue 6. - P. 512-521.

[6] Camporeale S. M. high-fidelity real-time simulation code of gas turbine dynamics for control applications / S. M. Camporeale, B. Fortunato, M. A. Mastrovito // American Society of Mechanical Engineers, International Gas Turbine Institute, Turbo Expo (Publication) IGTI. - 2002. - Vol. 2A.- P. 169-182.

[7] Zhang H. Hardware-in-the-loop simulation study on the fuel control strategy of a gas turbine engine / H. Zhang, M. Su, S. Weong // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. - 2005. - Vol. 127. – Issue 3. - P. 693-695.

[8] Camporeale S. M. A modular code for real time dynamic simulation of gas turbines in simulink / S. M. Camporeale, B. Fortunato, M. Mastrovito // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. - 2006. - Vol. 128. – Issue 3. - P. 506-517.

[9] Mansurova A.M. Mathematical modelling of turbine setting of engines and plants / A. M. Mansurova, A. P. Tunakov, A. S. Khamzin // 51st Israel Annual Conference on Aerospace Sciences. - 2011. - Vol. 1. - P. 372-381.

[10] Chapman J. W. Practical techniques for modeling gas turbine engine performance / J. W. Chapman, T. M. Lavelle, J. S. Litt // 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. - 2016.

[11] Gafurov S. HIL test bench for engine's fuel control systems investigation / S. Gafurov, L. Rodionov, A. Kryuchkov, H. Handroos // 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS. - 2016.

[12] Jaw L. C. Aircraft engine controls: design, system analysis, and health monitoring / L. C. Jaw, J. D. Mattingly // American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc. - 2009.

[13] Aircraft Engine Controls. Design, System Analysis, and Health Monitoring / C. J. Link, D. M. Jack // Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg. - 2009. - 397 p.

[14] Чернодуб А. Н. Обзор методов нейроуправления / А. Н. Чернодуб, Д. А. Дзюба // Проблемы программирования. - 2011. - Т.2. - С. 79-94.

[15] Isermann R. Perspectives of automatic control / R. Isermann // Control Engineering Practice. - 2011. - Vol.19. - P. 1399-1407.

[16] Tao G. Multivariable adaptive control: A survey / G. Tao // Automatica. - 2014. - Vol. 50. - P. 2737-2764.

[17] Cybenko G. Approximation by Superpositions of a Sigmoidal Function / G. Cybenko // Mathematics of Control, Signals and Systems. - 1989. - Vol. 2. – Issue 4. - P. 303-314.

DYNAMIC CHARACTERISTICS IDENTIFICATION AND NONLINEAR REGULATOR SYNTHESIS OF A SMALL GAS TURBINE ENGINE BASED ON NEURAL NETWORKS

Aleksandr V. Kuznetsov,
Georgiy M. Makaryants

Samara University
34, Moskovskoe shosse, Samara,
443086, Russian Federation
a.v.kuznetsov91@mail.ru

Annotation. Latterly, neural networks have been used to simulate gas turbine engine dynamics and regulator synthesis. However, little attention has been paid to structure rationalizing of the neural network for identification problems. In addition, neural networks are often used for control issues. Usually these problems are tuning PID regulator coefficients or control in the certain modes. Therefore, it is important to study of the neural network structure dependence on the simulated engine parameter and the neurocontroller synthesis to control the engine in all modes. The neural network architecture was studied for rotor frequency parameter based on the engine tests. In the result neurocontroller was synthesized based on the JetCat P-60 SE engine model taking into account the limitations of the engine fuel consumption. The results allow us to reduce the total time to model engine and synthesys nonlinear controller.

Keywords: Gas turbine engine; identification; nonlinear model; neurocontroller; neural networks

References

- [1] Camporeale S.M., Fortunato, B. and Dumas, A. (1997), "Nonlinear simulation model and multivariable control of a regenerative single shaft gas turbine", *IEEE Conference on Control Applications*, Proceedings, pp. 721-723.
- [2] Traverso, A., Calzolari, F. and Massardo, A. (2003) "Transient analysis of and control system for advanced cycles based on micro gas turbine technology", International Gas Turbine Institute, Turbo Expo (Publication) IGTI, American Society of Mechanical Engineers, vol. 3, pp. 201-209.
- [3] Cuevas, L.C., Jayme, S.D.L., Reyes, J.A.P. and Ciseña, J.A.L. (2009), "Application of neurofuzzy speed and load control for gas turbine power units", *19th Annual Joint ISA POWID/EPRI Controls and Instrumentation Conference and 52nd ISA POWID Symposium*, vol. 477, pp. 352-366.
- [4] Stößel, M., Bindl, S. and Niehuis, R. (2013), "Rotating stall inception inside the low pressure compressor of a twin-spool turbofan engine", *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, vol. 6A.
- [5] Montazeri-Gh., M., Abyaneh, S. and Kazemnejad, S. (2016), "Hardware-in-the-Loop Simulation of Two-Shaft Gas Turbine Engine's Electronic Control Unit", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 230, Issue 6. pp. 512-521.
- [6] Camporeale, S.M., Fortunato, B. and Mastrovito, M. (2002), "A high-fidelity real-time simulation code of gas turbine dynamics for control applications", *International Gas Turbine Institute, Turbo Expo (Publication) IGTI*, American Society of Mechanical Engineers, vol. 2A, pp. 169-182.
- [7] Zhang, H., Su, M., Weng, S. (2005), "Hardware-in-the-loop simulation study on the fuel control strategy of a gas turbine engine", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 127, Issue 3. pp. 693-695.
- [8] Camporeale, S.M., Fortunato, B. and Mastrovito, M. (2006), "A modular code for real time dynamic simulation of gas turbines in Simulink", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 128, Issue 3, pp. 506-517.
- [9] Mansurova, A.M., Tunakov, A.P. and Khamzin, A.S. (2011), "Mathematical modelling of turbine setting of engines and plants», *51st Israel Annual Conference on Aerospace Sciences*, vol. 1, pp. 372-381.
- [10] Chapman, J.W., Lavelle, T.M. and Litt, J.S. (2016), "Practical techniques for modeling gas turbine engine performance", *52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*.
- [11] Gafurov, S., Rodionov, L., Kryuchkov, A. and Handroos, H. (2016), "HIL test bench for engine's fuel control systems investigation", *30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS*.
- [12] Jaw, L.C. and Mattingly, J.D. (2009), "Aircraft engine controls: design, system analysis, and health monitoring", American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc.
- [13] Link, C.J. and Jack, D.M. (2009), *Aircraft Engine Controls. Design, System Analysis, and Health Monitoring*, Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, Virginia, USA, 397 p.
- [14] Chernodub, A.N. and Dzuba, D.A. (2011), "Overview of Neurocontrol Techniques" [Obzor metodov neyroupravleniya], *Programming issues*, vol. 2, pp. 79-94.

- [15] Isermann, R. (2011), "Perspectives of automatic control", *Control Engineering Practice*, vol. 19, pp. 1399-1407.
- [16] Tao, G. (2014), "Multivariable adaptive control: A survey", *Automatica*, vol. 50, pp. 2737-2764.
- [17] Cybenko, G. (1989), "Approximation by Superpositions of a Sigmoidal Function", *Mathematics of Control, Signals and Systems*, vol. 2, Issue 4, pp. 303-314.