

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТУРБОВИНТОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Иванов А.В.

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия
e-mail: TemkaW@mail.ru*

В целях оптимизации процесса расчета нелинейной поэлементной математической модели турбовинтового двигателя при испытаниях воздушных винтов и систем автоматического управления на стенде полунатурного моделирования предложен подход нахождения совместной точки работы компрессоров и турбин с применением генетического алгоритма. Проведено исследование эффективности генетического алгоритма при решении указанной задачи, определена целесообразность его применения.

Ключевые слова: генетический алгоритм, моделирование турбовинтового двигателя, стенд полунатурного моделирования.

Испытание воздушных винтов и их систем автоматического управления на стенде полунатурного моделирования

В процессе создания и доводки современных воздушных винтов (ВВ), соосных винтовентиляторов (СВВ) и их систем автоматического управления (САУ) огромную роль играют стенды полунатурного моделирования (СПМ) (рис. 1).

Идея полунатурного моделирования заключается в подмене одного или нескольких натуральных объектов, участвующих в испытаниях, их моделью с целью снижения себестоимости испытаний или с целью исключения влияния натуральных объектов друг на друга (в случае поиска дефектов в изделии). Нередко полунатурное моделирование является единственным способом проведения испытаний в условиях отказных или аварийных ситуаций, что связано с техническими проблемами их имитации, рисками и недопустимостью по причине опасности.

Современный СПМ обеспечивает проведение различных видов испытаний: обкатки гидромеханических регуляторов (регуляторов), приемосдаточных и предъявительских испытаний ВВ и регуляторов, эквивалентно-циклических испытаний регуляторов, износных испытаний ВВ, а также различного рода исследовательских испытаний ВВ и их САУ. Особый интерес представляют исследовательские испытания, позволяющие определить запас устойчивости САУ ВВ во всем ожидаемом диапазоне режимов работы, отработать законы и алгорит-

мы управления САУ ВВ, построить статические и динамические характеристики ВВ и регуляторов, смоделировать поведение САУ в условиях отказных ситуаций.

Достоверность результатов испытаний, проводимых на СПМ, напрямую зависит от соответствия математических моделей (ММ) реальным объектам, а также от способности исполнительных механизмов воспроизвести параметры ММ.

Основным моделируемым объектом при испытаниях ВВ и регуляторов на СПМ является турбовинтовой двигатель (ТВД), так как он регулируется по частоте вращения и создает требуемую мощность для ВВ, обеспечивающего необходимую тягу. Для достижения максимальной достоверности результатов испытаний, проводимых на СПМ, необходимо обеспечить воспроизведение статических и динамических характеристик реального ТВД во всех ожидаемых условиях эксплуатации.

Особенности моделирования двигателя на нестационарных режимах работы (разгон и торможение, встречная приемистость и др.) подробно рассмотрены в работах [1–4]. Применение линейных методов моделирования ТВД (кусочно-линейная динамическая модель и др.) при проведении испытаний ВВ совместно с САУ на СПМ приводит к большим погрешностям воспроизведения нестационарных режимов работы с большими сигналами управления. В связи с этим предпочтительным является применение нелинейной ММ ТВД.

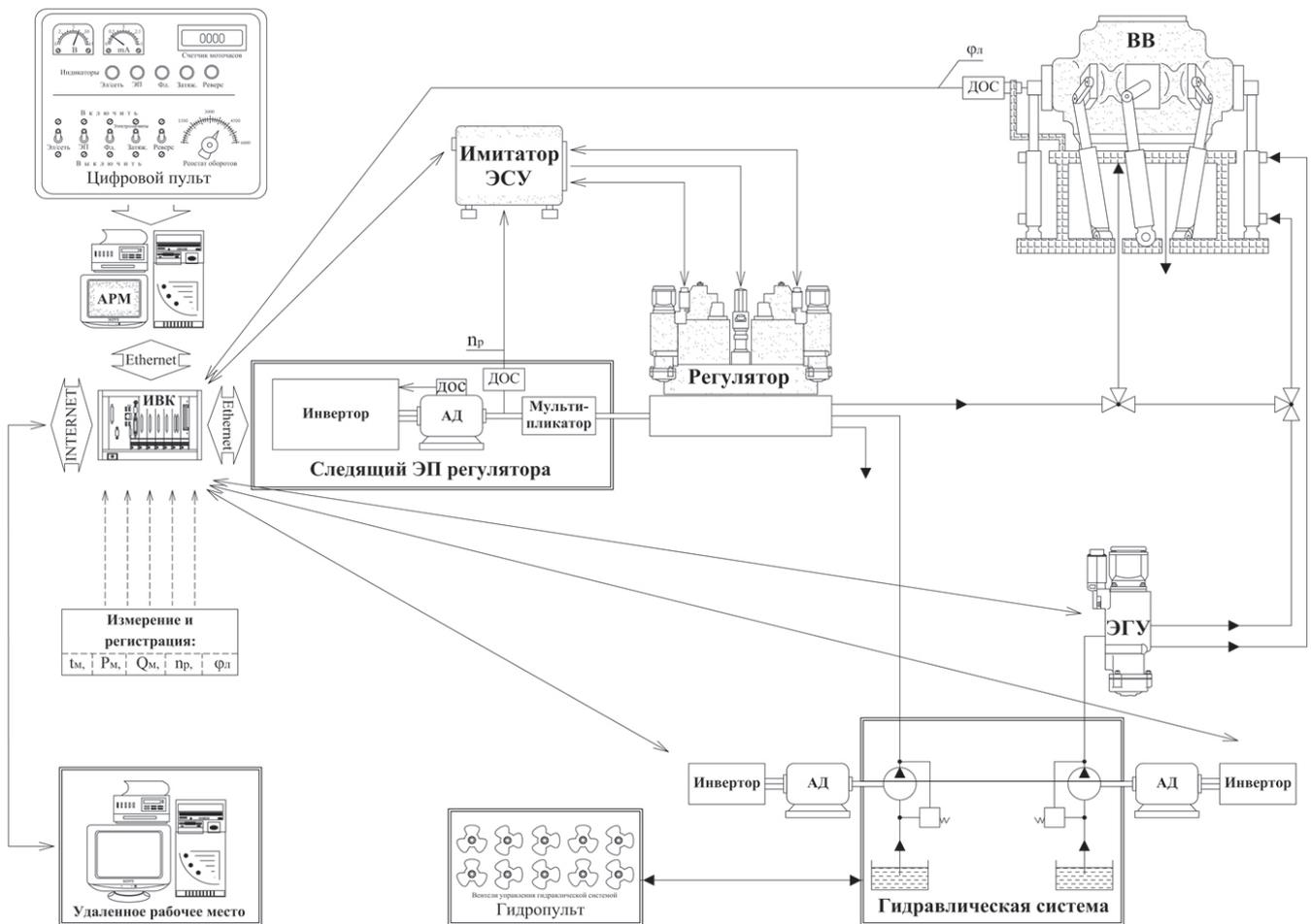


Рис. 1. Функциональная схема стенда полунатурного моделирования для испытаний воздушных винтов: АД — асинхронный электродвигатель; АРМ — автоматизированное рабочее место; ВВ — воздушный винт; ДОС — датчик обратной связи; ИВК — измерительно-вычислительный комплекс; ЭГУ — электрогидропреобразующее устройство; ЭП — электропривод; ЭСУ — электронная система управления

Постановка проблемы

В настоящее время НПП «Аэросила» при испытаниях соосных винтовентиляторов СВ-27 и их САУ на стенде полунатурного моделирования 311ПР использует нелинейную поэлементную математическую модель (НПММ) турбовинтовентиляторного двигателя (ТВВД) Д-27. Указанная математическая модель ТВВД Д-27 реализована в среде LabView, прошла процесс идентификации во всех ожидаемых условиях полета не только по расчетно-экспериментальным характеристикам двигателя Д-27, но и по результатам летных испытаний самолета Ан-70.

При проведении испытаний на СПМ необходимо обеспечить работу всех ММ в режиме реального времени, поскольку их параметры оказывают воздействие непосредственно на натурные объекты испытаний. В связи с большим количеством ММ, применяемых на СПМ (моделирование условий полета, САУ, аэродинамических характеристик ВВ, топливо-регулирующей аппаратуры, системы

имитации полетной нагрузки и др.), большое внимание уделяется оптимизации расчета и повышению скорости вычислений.

Одной из наиболее критичных ММ с точки зрения вычислительной мощности является НПММ ТВД. Поэтому актуальным вопросом является оптимизация вычислений при работе ММ ТВД.

В настоящее время при разработках программного обеспечения в системах искусственного интеллекта, искусственных нейронных сетях и для решения задач оптимизации в различных областях науки и техники широкое применение находят генетические алгоритмы (ГА). Применение ГА для решения задач управления полетом и силовой установкой летательного аппарата рассмотрено в работах [5–7].

ГА возникли в результате наблюдения и попыток воспроизведения естественных процессов, происходящих в мире живых организмов, в частности эволюции и связанной с ней селекции (естествен-

ного отбора) популяций живых существ [8]. В основе ГА лежит принцип поиска наиболее приспособленной особи с помощью механизмов естественного отбора и генетического наследования, применяемых к исходной популяции особей.

Так как ГА является современным методом решения задач оптимизации, он может быть применен в ММ ТВД для нахождения совместной точки работы компрессоров и турбин. Однако оценка эффективности ГА для решения обозначенной задачи может быть дана только после его апробации.

Применение генетического алгоритма при моделировании турбовинтового двигателя

Наиболее значимым в плане оптимизации в ММ ТВД является процесс нахождения совместной точки работы компрессоров и турбин, требующий многократного последовательного пересчета термодинамической модели газогенератора. В настоящее время на НПП «Аэросила» при моделировании ТВВД Д-27 на СПМ 311ПР для решения указанной задачи используется метод последовательного приближения путем половинного деления. Так как целью последовательного приближения является нахождение минимума разности $|p_c^* - p_n|$, где p_c^* — давление торможения на срезе выходного устройства; p_n — физическое давление на входе в двигатель, то для решения указанной задачи могут быть применены различные оптимизационные методы, в частности ГА.

Для нахождения совместной точки работы компрессоров и турбин ГА был реализован в среде LabView совместно с поэлементной нелинейной ММ ТВВД Д-27 (рис. 2).

Программный модуль «Создание исходной популяции.vi» создает заданное количество особей исходной популяции. Каждая особь популяции несет в хромосомах закодированное генами значение (фенотип) приведенного массового расхода воздуха через компрессор низкого давления (КНД). Программный модуль «Создание исходной популяции.vi» выполняется только при первом обращении к программе ММ ТВВД Д-27. Для сокращения эволюционного процесса и увеличения скорости поиска наиболее приспособленной особи при втором и последующих вызовах программы ТВВД Д-27 в ГА участвуют особи последней полученной популяции (потомки). Программный модуль «Вычисление фенотипа.vi» производит преобразование генотипа каждой особи в соответствующий ему фенотип — значение массового приведенного расхода воздуха через КНД, по которому происходит расчет термодинамической модели газогенератора. Программный модуль «Максимальная разность $P_c - P_n$.vi» находит максимально возможное значение

выражения $\frac{|p_c^* - p_n|}{p_n}$, используемое в дальнейшем

программным модулем «Функция приспособленности.vi» для расчета значений приспособленности к выживанию (размножению) для каждой особи.

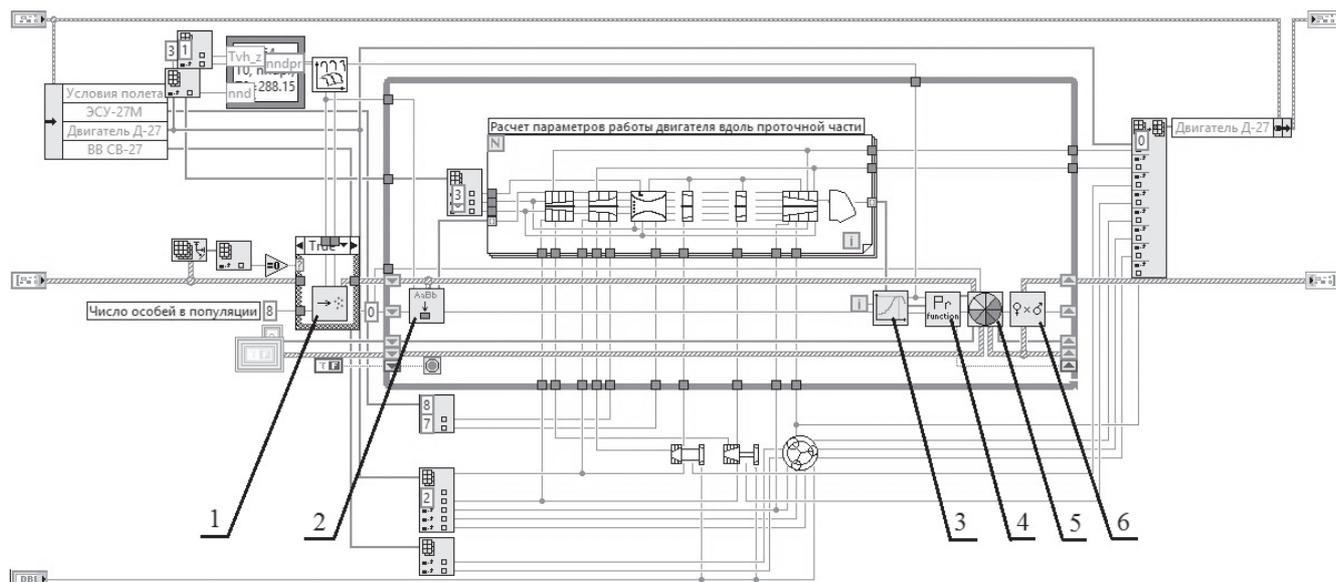


Рис. 2. Программный код LabView НППМ ТВВД Д-27 на СПМ 311ПР ОАО «НПП «Аэросила» с применением генетического алгоритма: 1 — модуль «Создание исходной популяции.vi»; 2 — модуль «Вычисление фенотипа.vi»; 3 — модуль «Максимальная разность $P_c - P_n$.vi»; 4 — модуль «Функция приспособленности.vi»; 5 — модуль «Отбор особей.vi»; 6 — модуль «Скрещивание особей.vi»

Программный модуль «Отбор особей.vi» производит разбиение особей на пары для скрещивания (селекция особей) в программном модуле «Скрещивание особей.vi».

Анализ результатов применения генетического алгоритма при моделировании турбовинтового двигателя

Работа ГА была проверена при различных значениях выражения

$$\left(\frac{|p_c^* - p_n|}{p_n} \right)_{\min} \quad (\text{от } 0,0001 \text{ до } 0,4),$$

различном числе особей в популяции (от 4 до 2000), различных вероятностях мутации генов в каждой хромосоме (от 0,05 до 50 %). Были опробованы различные методы отбора особей (панмиксия, инбридинг, аутбридинг, турнирный метод, ранговая селекция, метод рулетки) и различные методы скрещивания (одноточечный кроссинговер, многоточечный кроссинговер, однородный кроссинговер, перетасовочный кроссинговер). В результате этого была определена оптимальная конфигурация ГА для решения поставленной задачи. Наиболее эффективным оказался отбор методом рулетки с применением однородного кроссинговера при скрещивании особей.

При точности расчета $\frac{|p_c^* - p_n|}{p_n} \leq 0,01$ (рис. 3)

ГА производит недопустимо большое количество итераций для каждой расчетной точки переходного

процесса, в то время как при той же точности расчета метод последовательного приближения путем половинного деления производит от 10 до 16 итераций. Кроме этого, было установлено, что ГА является относительно нестабильным методом расчета, так как количество итераций, необходимое для нахождения однотипных расчетных точек, может различаться на несколько порядков.

Значительное увеличение скорости расчета наблюдается только при уменьшении точности рас-

чета до значения выражения $\frac{|p_c^* - p_n|}{p_n} \leq 0,4$ (рис. 4).

В этом случае максимальной скорости расчета удается достигнуть только при минимальном числе особей в популяции. Так, четыре особи в популяции позволяют найти искомое решение при совершении восьми итераций пересчета термодинамической модели газогенератора (рис. 5). Это связано с тем, что для нахождения искомой точки расчета необходимо совершить минимально один эволюционный процесс (одно размножение особей популяции), поэтому минимальное количество итераций будет в два раза превышать число особей в популяции, что делает нецелесообразным дальнейшее увеличение числа особей в популяции.

На основе проведенных исследований эффективности применения ГА в НПММ ТВВД Д-27 установлено, что при точности расчета, соответ-

ствующей значению выражения $\frac{|p_c^* - p_n|}{p_n} \leq 0,4$, ГА

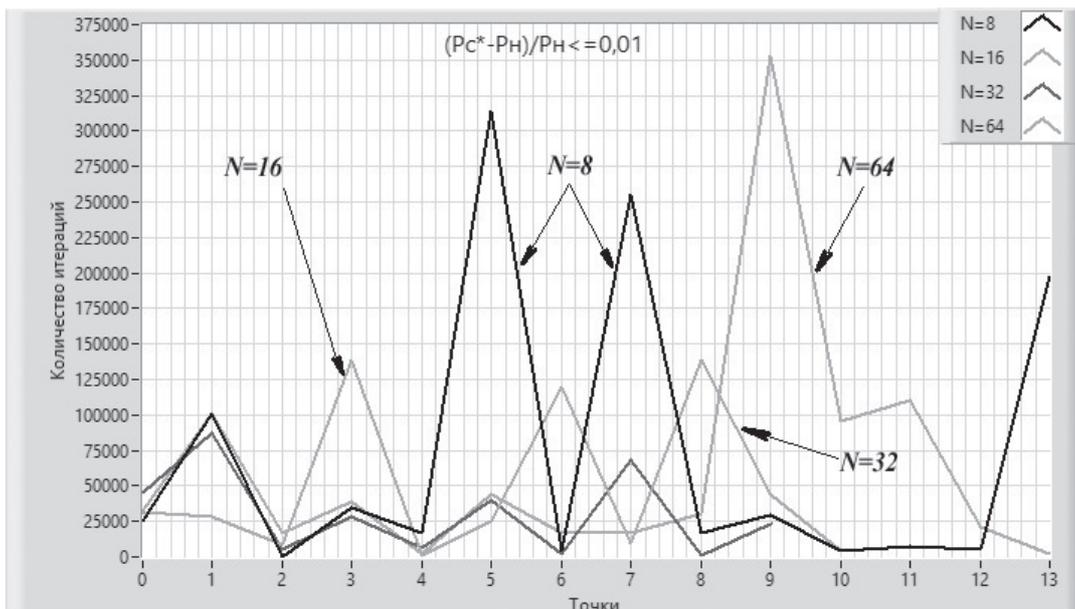


Рис. 3. Результат отработки ГА при значении выражения $\frac{|p_c^* - p_n|}{p_n} \leq 0,01$ и различном числе N особей в популяции

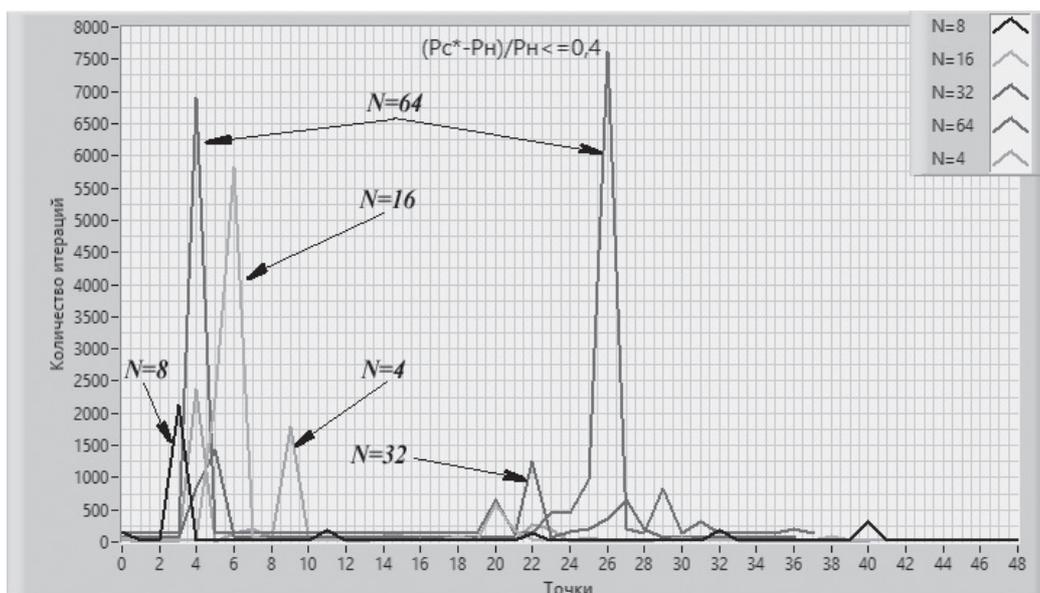


Рис. 4. Результат отработки ГА при значении выражения $\frac{|P_c^* - P_n|}{P_n} \leq 0,4$ и различном числе N особей в популяции

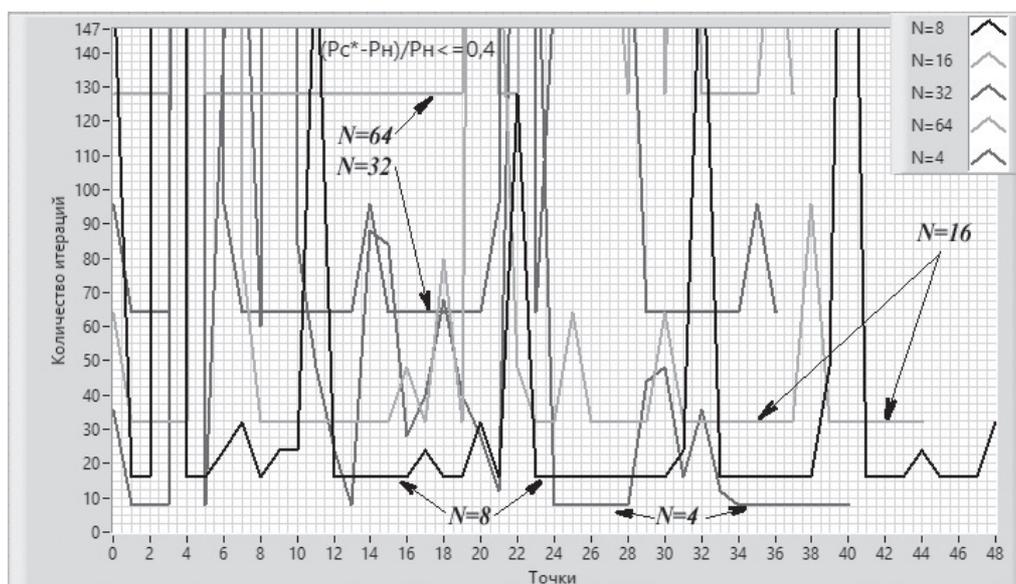


Рис. 5. Результат отработки ГА при значении выражения $\frac{|P_c^* - P_n|}{P_n} \leq 0,4$ и различном числе N особей в популяции (увеличенный масштаб)

оказывается сравнимым по эффективности с методом последовательного приближения путем половинного деления, производящим в этом случае от 5 до 11 итераций расчета термодинамической части НПММ ТВВД. Однако нестабильность ГА приводит к увеличению количества итераций при расчете некоторых «выпадающих» точек (рис. 4), что свидетельствует о нецелесообразности применения ГА для нахождения совместной точки работы компрессоров и турбин в НПММ ТВВД, применяемой на СПМ. В настоящее время наиболее рациональ-

ным средством решения поставленной задачи остается методом последовательного приближения путем половинного деления.

Выводы

1. Эффективность генетического алгоритма сравнима с эффективностью метода последовательного приближения путем половинного деления при точности расчета ММ ТВД, соответствующей зна-

чению выражения $\frac{|P_c^* - P_n|}{P_n} \leq 0,4$.

2. Генетический алгоритм является нестабильным методом расчета ММ ТВД, допускающим значительное увеличение потребного количества итераций для вычисления однотипных точек.

3. Низкая эффективность генетического алгоритма при достаточной точности расчета ММ ТВД свидетельствует о нецелесообразности его применения для решения поставленной задачи.

4. Наиболее эффективным методом нахождения совместной точки работы компрессоров и турбин в ММ ТВД остается метод последовательного приближения путем половинного деления.

Библиографический список

1. Гуревич О.С. Системы автоматического управления авиационными ГТД: Энциклопедический справочник. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. — С. 153-160.
2. Ахмедзянов Д.А., Кривошеев И.А., Сунарчин Р.А. Совместная работа авиационных газотурбинных двигателей и топливной автоматики на режимах разгона и торможения // Вестник СГАУ. 2006. № 1. С. 24-25.
3. Ахмедзянов Д.А., Власова Е.С., Кишалов А.Е. Методология имитационного моделирования неустойчившихся режимов работы авиационных ГТД // Вестник СГАУ. 2006. № 2 (10). С. 41-44.
4. Ахмедзянов Д.А. Неустойчившиеся режимы работы авиационных ГТД // Вестник УГАТУ. 2006. Т.7. №1 (14). С. 36-46.
5. Пантелеев А.В., Метлицкая Д.В. Применение генетических алгоритмов к задаче оптимального управления дальностью полета летательного аппарата типа воздух—воздух // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. №4. С. 102-113.
6. Пантелеев А.В., Метлицкая Д.В. Формирование генетических алгоритмов поиска оптимального управления средней скоростью полета летательного аппарата типа воздух—воздух // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т.19. №3. С. 149-159.
7. Гусев Ю.М., Данилин О.Е., Бадамшин Б.И. Решение задачи оптимизации удельного расхода топлива ТВВД на основе интеллектуальных методов управления и анализ полученных результатов // Вестник УГАТУ. 2010. Т.14. №2 (37). С. 136-145.
8. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Пер. с польск. И.Д. Рудинского. — М.: Горячая линия — Телеком, 2006. — 452 с.

STUDY OF GENETIC ALGORITHM IMPLEMENTATION EFFICIENCY WHILE TURBOPROP ENGINE MODELING

Ivanov A.V.

Moscow Aviation Institute (National Research University),
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia
e-mail: TemkaW@mail.ru

Abstract

Propellers design and development for modern coaxial propfans and their automated control systems are impossible without in-line simulation test benches, which allow reduce testing fee, imitate failure situations, work through control laws and algorithms and determine automated control systems stability margins.

Turboprop engine mathematical model plays key role while testing propellers and automatic control systems with in-line simulation test benches. The tests validity depends on accuracy of non-stationary processes reproduction by mathematical model. Due to turboprop dynamic characteristics errors when employing linear methods of modeling, at present, non-linear element-by-element models became widely used. In the course of SV-27 coaxial propfan and RSV-27 hydro-

mechanical regulator testing with in-line simulation test bench, JSC SPE "Aerosila" employs D-27 turboprop non-linear element-by-element model. Implementation of gas turbine engines non-linear models results in significant processing power waste due to the multiple recalculation of the thermodynamic mathematical model while compressors and turbines joint operation point search. To optimize the computational process while using a non-linear turboprop engine mathematical model the authors suggest to use of a genetic algorithm. Genetic algorithm was developed with LabView software, employed with in-line simulation test bench and associated with the engine mathematical model. Genetic algorithm of various configurations and probability values of mutations and number of species in population

implementation efficiency was studied. The results of the study allowed determine the optimal genetic algorithm configuration and parameters of its optimal operation. In its optimal configuration with a small number of species in population and increased calculating error, this genetic algorithm appeared to be effectiveness comparable to method of successive approximations by bisection. However, the genetic algorithm execution instability, leading to computational resources wasting for some calculated points, makes its implementation in turboprop engine mathematical model, used with in-line simulation test bench for air propellers tests and their automated control systems, impractical

Keywords: genetic algorithm, turboprop engine simulation, in-line simulation test-bench.

References

1. Gurevich O.S. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya aviatsionnymi GTD* (Automatic control systems for aircraft GTE), Moscow, TORUS PRESS, 2011, pp. 153-160.
2. Akhmedzyanov D.A., Krivosheev I.A., Sunarchin R.A. *Vestnik SGAU*, 2006, no. 1, pp. 24-25.
3. Akhmedzyanov D.A., Vlasova E.S., Kishalov A.E. *Vestnik SGAU*, 2006, no. 2 (10), pp. 41-44.
4. Akhmedzyanov D.A. *Vestnik UGATU*, 2006, vol. 7, no. 1 (14), pp. 36-46.
5. Panteleev A.V., Metlitskaya D.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2011, vol. 18, no. 4, pp. 102-113.
6. Panteleev A.V., Metlitskaya D.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2012, vol. 19, no. 3, pp. 149-159.
7. Gusev Yu.M., Danilin O.E., Badamshin B.I. *Vestnik UGATU*, 2010, vol. 14, no. 2 (37), pp. 136-145.
8. Rutkovskaya D., Pilin'skii M., Rutkovskii L. *Neironnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy* (Neural nets, genetic algorithms and fuzzy systems), Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 2006, 452 p.