

УДК 621.372

БИОНИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ПРОЕКТИРОВАНИИ МИКРО- И НАНОСИСТЕМ*

Л.А.Зинченко¹, Б.С. Сорокин²

В докладе рассматриваются различные подходы к использованию бионических информационных систем в задачах проектирования микро- и наносистем. Проводится сравнение эффективности различных подходов. Показано, что выбор метода оценки пригодности альтернативных решений является одним из основных факторов, влияющих на эффективность нахождения лучшего решения.

Введение

Микро- и наносистемы находят все большее применение в различных отраслях, включая автомобильную электронику, телекоммуникационные системы [Зинченко и др., 2003] и т. д. Одной из основных тенденций разработки перспективных микро- и наносистем является интеграция различных электрических, механических, оптических и т.п. подсистем в одном устройстве. Однако использование различных физических эффектов в одном устройстве приводит к значительному усложнению процедуры проектирования в связи с требованием моделирования различных подсистем на различных уровнях абстракции, включая физико-топологические модели. Эти проблемы усложняются при моделировании наносистем в связи тем, что в процессе проектирования необходимо использовать как классические модели, так и модели, основанные на квантовой механике. Процесс проектирования на основе существующих в настоящее время пакетов моделирования компонентов микро- и наносистем, например, ANSYS, Comsol и т.д., может занять несколько дней только для анализа концепции проектируемого устройства.

Для уменьшения вычислительных затрат при проектировании микро- и наносистем необходим корректный выбор маршрута проектирования на

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 04-01-00174)

¹ 105005, г. Москва, НУК ИУ МГТУ им. Н.Э. Баумана, lyudmillaa@mail.ru

² 124365, г. Москва, ИИИСТ, sorokin@innosystech.ru

основе высокоэффективных систем автоматизированного проектирования микро- и наносистем.

Анализ литературных источников позволяет сделать вывод, что в настоящее время разрабатываются различные подходы к решению указанных проблем. Одним из наиболее простых путей решения этой проблемы является использование макромоделей на основе обыкновенных дифференциальных уравнений. Этот подход был реализован в пакетах SUGAR и NODAS. Однако моделирование микро- и наносистем на основе этого подхода позволяет только оценить соответствие одного из возможных альтернативных решений заданным проектным требованиям. Необходимо также отметить, что при автоматизации проектирования микроэлектромеханических систем нахождение оптимального решения представляет вычислительно сложную задачу в связи с тем, что при многокритериальной оптимизации таких систем необходимо проведение междисциплинарных расчетов при различных параметрах элементов. В связи с этим возникает задача выбора такого маршрута автоматизации проектирования, который обеспечивает компромисс между вычислительной сложностью поставленной задачи и необходимостью поиска лучшего решения для обеспечения конкурентоспособности разрабатываемого устройства.

В докладе анализируются только основные подходы, базирующиеся на применении бионических информационных систем для решения поставленной задачи. В настоящее время в области бионических систем проектирования микро- и наносистем можно выделить 2 основных подхода:

- системы на основе использования мягких вычислений для решения задач автоматизированного проектирования микро- и наносистем;
- системы на основе комбинации мягких вычислений и других методов искусственного интеллекта.

1. Основные подходы к построению бионических систем автоматизированного проектирования микро- и наносистем

1.1. Системы автоматизированного проектирования микро- и наносистем, основанные на генетических алгоритмах и генетическом программировании

Эволюционные вычисления используются на различных этапах проектирования микро- и наносистем. В [Li et al, 1998] генетические алгоритмы были применены для выбора шаблона изготовления микроэлектромеханических систем, обеспечивающего минимальное отклонение от требуемой формы. На каждой генерации функция приспособленности оценивалась как величина, обратно пропорциональная сумме относительных разбросов геометрических параметров

микроэлектромеханической системы. В [Ma et al., 2001] этот подход был расширен путем применения комбинации генетических алгоритмов и схемы поиска устойчивых решений (GA/RS³). Для отбора лучших решений использовалась модифицированная функция приспособленности с аддитивным вектором случайных изменений в фенотипе.

Наиболее сложной задачей является проектирование микроэлектромеханических систем на начальных этапах. Для решения задачи сквозного автоматизированного проектирования микроэлектромеханических систем в работах [Zhou et al, 2001], [Zhou et al, 2002] многокритериальные генетические алгоритмы были применены на компонентном уровне проектирования микроэлектромеханических систем. На рис. 1 представлена использованная в [Zhou et al, 2001], [Zhou et al, 2002] обобщенная схема эволюционного проектирования микроэлектромеханических систем на компонентном уровне. Для моделирования отдельных компонентов был использован пакет SUGAR. Для отбора лучших решений для каждого альтернативного решения вычислялся его ранг на основе критерия Парето-оптимальности. Дальнейшим развитием этих работ стало введение геометрических ограничений на этапе генерации новых решений [Kamalian et al, 2004].

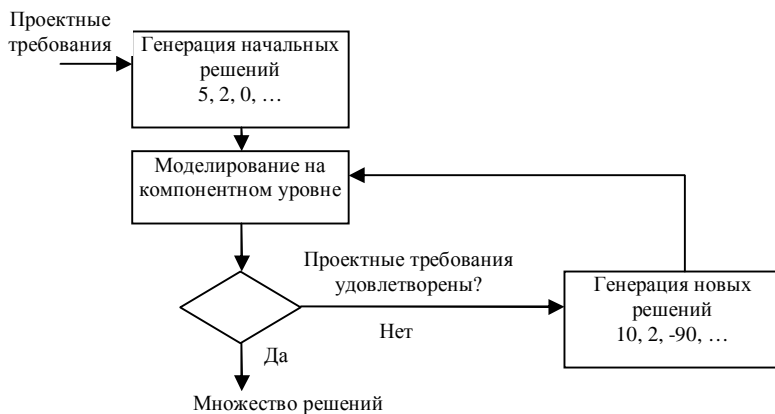


Рис. 1. Обобщенная схема эволюционного проектирования микроэлектромеханических систем на компонентном уровне

Однако моделирование микроэлектромеханических систем на компонентном уровне (рис. 1) не позволяет провести корректную оценку приспособленности альтернативных решений. В связи с этим в работе [Zhang et al, 2005] была предложена иерархическая схема эволюционного проектирования микроэлектромеханических систем (рис. 2). Оценка

приспособленности решений выполнялась на компонентном уровне. В случае нахождения решений, удовлетворяющих проектным требованиям на компонентном уровне, пригодность найденных проектных решений также оценивалась на основе метода конечных элементов. В случае несоответствия найденных решений заданным проектным требованиям процесс проектирования возвращался к этапу эволюционного проектирования на компонентном уровне. Существенным недостатком предложенного подхода (рис. 2) является случайный поиск решений, удовлетворяющих заданным проектным требованиям при оценке альтернативных решений методом конечных элементов.

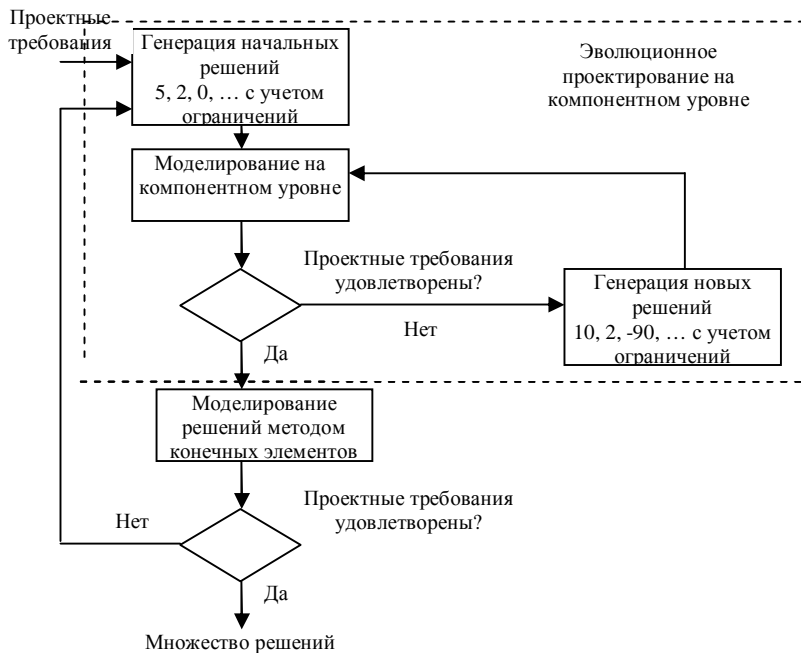


Рис. 2. Иерархическая схема эволюционного проектирования микроэлектромеханических систем

Сложность изготовления микроэлектромеханических систем явилась причиной дальнейшей модификации иерархической схемы эволюционного проектирования (рис. 2). В работе [Kamalian et al, 2005] было показано, что точность моделирования на компонентном уровне является недостаточной для последующего производства микроэлектромеханических систем. В связи с большим расхождением

между результатами моделирования и измеренными характеристиками было предложено [Kamalian et al, 2005] адаптировать геометрические ограничения на этапе генерации новых решений по результатам проведенных измерений.

Другим способом решения проблемы корректного проектирования микроэлектромеханических систем является использование эволюционных аппаратно-программных комплексов [Keumeulen et al, 2006]. Степень приспособленности различных альтернативных проектных решений оценивалась по результатам измерения характеристик микроэлектромеханических гироскопов, что позволило избежать проблем вычислительно сложного моделирования проектируемых систем.

В работе [Kamalian et al, 2007] для решения проблемы корректного проектирования микросистем предложено использовать интерактивные эволюционные вычисления. На каждой заданной итерации проектировщик вносил изменения в ход эволюционного процесса, базируясь на опыте проектирования аналогичных микросистем. Применение интерактивных эволюционных вычислений в задачах проектирования микросистем позволило обеспечить компромисс между результатами эволюционного проектирования и вычислительными затратами [Kamalian et al, 2007].

Генетическое программирование для проектирования микроэлектромеханических систем на компонентном уровне было использовано в [Fan et al, 2003] для эволюционного проектирования структуры и параметров систем на основе эволюции графов связи. Отбор лучших решений выполнялся на основе адаптивной нормализованной функции приспособленности. Для оценки функции пригодности был использован коммерческий пакет 20Sim, позволяющий моделировать динамические системы на основе решения обыкновенных дифференциальных уравнений. Были получены новые топологии проектируемых микроэлектромеханических систем. Необходимо заметить, что вычислительные затраты в [Fan et al, 2003] значительно уменьшились по сравнению с подходами, использующими метод конечных элементов.

1.2. Автоматизированные системы проектирования микро- и наносистем, основанные на моделировании отжига

Алгоритмы моделирования отжига, являющиеся альтернативой алгоритмам эволюционных вычислений, также применяются при проектировании микро- и наносистем.

Для автоматизации физического проектирования микроэлектромеханических систем алгоритмы моделирования отжига были использованы в [Fedder, 1996] для оптимизации топологии резонаторов на основе поведенческих моделей.

В работе [Kamalian et al, 2002] было предложено использование алгоритмов моделирования отжига для автоматизированного проектирования микроэлектромеханических систем на компонентном уровне. Было показано, что в случае однокритериальной оптимизации этот подход позволяет генерировать корректные решения в несколько раз быстрее по сравнению с генетическими алгоритмами. Однако для задач многокритериальной оптимизации решение, найденное алгоритмами моделирования отжига, оказалось в несколько раз хуже по сравнению с решением, найденным многокритериальными генетическими алгоритмами. Это объясняется тем, что многокритериальные генетические алгоритмы оказались способны преодолеть локальные экстремумы и найти лучшее решение.

В работе [Keumeulen et al, 2005] предложено использование аппаратно-программных комплексов для настройки микроэлектромеханических гироскопов на основе применения алгоритмов моделирования отжига. Это позволило оценить степень приспособленности различных альтернативных проектных решений по результатам измерений их характеристик. Проведенное сравнение результатов настройки гироскопов на основе генетических алгоритмов и алгоритмов моделирования отжига показало, что генетические алгоритмы находят лучшее решение при меньших вычислительных затратах.

1.3. Использование искусственных нейронных сетей в автоматизации проектирования микросистем

Искусственные нейронные сети в задачах автоматизации проектирования микросистем используются в основном для получения макромоделей на различных уровнях абстракции.

В работе [Liang et al, 2001] искусственные нейронные сети были использованы для моделирования нелинейного поведения микроэлектромеханических систем. Это позволило значительно сократить временные затраты на моделирование проектируемых систем за счет использования полученной сосредоточенной макромоделей. Отличительной чертой использования указанной модели была возможность моделирования исследуемой системы без потери точности.

Учитывая, что наибольшие вычислительные затраты при проектировании микроэлектромеханических систем составляет моделирование неэлектрических частей этих систем методом конечных элементов, в [Litovski et al, 2004] было предложено использовать искусственные нейронные сети для моделирования неэлектрических частей микроэлектромеханических систем на основе принципа «черного ящика». Сеть прямого распространения с одним скрытым слоем была обучена для аппроксимации поведения трансдьюсера. Аналогично в [Lee et al, 2004] на основе метода конечных элементов были получены данные

для обучения искусственной нейронной сети. Обученная нейронная сеть использовалась для предсказания поведения механического резонатора.

В [Litovski et al, 2004] искусственные нейронные сети использовались также для моделирования отказов микроэлектромеханических систем, что позволило избежать вычислительно сложного моделирования надежности проектируемых микроэлектромеханических систем на основе метода Монте-Карло. В основу обучения нейронной сети в [Pumoka et al, 2007] был заложен алгоритм обратного распространения ошибки, что позволило определить оптимальные параметры микроэлектромеханической системы с улучшенными показателями надежности.

1.4. Комбинационные подходы к построению интеллектуальных систем автоматизированного проектирования микро- и наносистем

Особенностью автоматизированного проектирования микросистем является сложность нахождения решения в связи с тем, что необходимо найти решение, удовлетворяющее ограничениям различной физической природы. Для преодоления проблемы поиска оптимального решения для междисциплинарных задач в системах автоматизированного проектирования микро- и наносистем используются комбинации различных подходов.

Комбинация рассуждений по прецедентам и многокритериальных генетических алгоритмов [Cobb et al, 2006] позволила обеспечить генерацию начальных решений (см. рис. 2) на основе базы данных системы рассуждений по прецедентам. В свою очередь результаты эволюционного проектирования микроэлектромеханических систем используются для пополнения упомянутой выше базы данных для последующих циклов проектирования. Для оценки степени пригодности генерируемых альтернативных решений и результатов параметрической оптимизации решений базы данных использовался пакет SUGAR.

Для уменьшения сложности работы проектировщика с системой интерактивного эволюционного проектирования микроэлектромеханических систем в [Kamalian et al, 2006] было предложено использовать нечеткую логику и алгоритмы машинного обучения для предсказания возможных коррекций процесса эволюционного проектирования. Использование нечеткой логики при проектировании микроэлектромеханических систем позволило сократить человеческие затраты в среднем на 50%, в то время как использование алгоритмов машинного обучения при решении указанных задач – в среднем на 20%.

Заключение

В настоящее время при проектировании микро- и наносистем активно используются методы искусственного интеллекта. Сложность нахождения

оптимального решения для подсистем, имеющих различную физическую природу, обусловила широкий диапазон различных подходов к автоматизации проектирования микро- и наносистем. Однако разработка бионических систем автоматизации проектирования микро- и наносистем представляется наиболее перспективной по сравнению с классическими подходами. Существенным фактором, сдерживающим применение бионических информационных систем при проектировании микро- и наносистем, являются значительные вычислительные затраты при оценке альтернативных проектных решений.

Для дальнейшего уменьшения вычислительных затрат представляется целесообразным использование эффективных алгоритмов генетического поиска, в частности, многоальтернативных генетических алгоритмы [Зинченко и др., 2003], которые обеспечивают нахождение проектного решения при минимальных вычислительных затратах.

Эффективность системы проектирования во многом определяется выбранной функцией приспособленности. В основном в исследованиях по автоматизированному проектированию микро- и наносистем используются статические функции приспособленности. Однако в работе [Zinchenko et al, 2008] показано, что коэволюционные функции приспособленности обеспечивают минимальные вычислительные затраты при эволюционном проектировании. Динамические функции приспособленности [Zinchenko et al, 2008] позволяют обеспечить баланс между вычислительной сложностью и эффективностью поиска проектного решения. Таким образом, использование специальных функций приспособленности позволит также уменьшить вычислительные затраты при проектировании микро- и наносистем.

Список литературы

- [Зинченко и др., 2003] Зинченко Л.А., Сорокин С.Н. Эволюционное проектирование элементов телекоммуникационных систем. – ТРТУ, 2003.
- [Cobb et al, 2006] Cobb C. L., Zhang Y., Agogino A. M. MEMS Design Synthesis: An Integrated MEMS Design Synthesis Architecture Using Case-Based Reasoning and Multi-Objective Genetic Algorithms // Proceedings of 2006 SPIE Smart Materials, Nano- and Micro-Smart Systems, Vol. 6414, 2006.
- [Fan et al, 2003] Fan Z., Goodman E., Hu J., Rosenberg R.C., Seo K. System-Level Synthesis of MEMS via Genetic Programming and Bond Graphs // Proceedings of the 2003 Genetic and Evolutionary Computation Conference GECCO-2003, 2003.
- [Fedder et al, 1996] Fedder G., Mukherjee T. Physical Design for Surface-Micromachined MEMS // Proceedings of the Fifth ACM/SIGDA Physical Design Workshop, 1996.
- [Plumoka et al, 2007] Plumoka A. A., Tan H. Neural Network-Based MEMS Failure Probability Prediction // Technical Proceedings Nanotech, 2007.

- [**Kamalian et al, 2002**] Kamalian R., Zhou N., Agogino A. M. A Comparison of MEMS Synthesis Techniques // 1st Pacific Rim Workshop on Transducers and Micro/Nano Technologies, Xiamen, China, 2002.
- [**Kamalian et al, 2004**] Kamalian R., Agogino A.M., Takagi H. The Role of Constraints and Human Interaction in Evolving MEMS Designs: Microresonator Case Study // Proceedings of DETC/DAC, 2004.
- [**Kamalian et al, 2005**] Kamalian R., Agogino A.M. Improving Evolutionary Synthesis of MEMS through Fabrication and Testing Feedback // Proceedings of 2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2005.
- [**Kamalian et al, 2006**] Kamalian R., Agogino A.M., Yeh E., Zhang Y., Takagi H. Reducing Human Fatigue in Interactive Evolutionary Computation through Fuzzy Systems and Machine Learning Systems // Proceedings of IEEE Conference on Fuzzy Systems, 2006.
- [**Kamalian et al, 2007**] Kamalian R., Agogino A.M., Takagi H. Use of Interactive Evolutionary Computation with Simplified Modeling for Computationally Expensive Layout Design Optimization // Proceedings CEC2007, 2007.
- [**Keymeulen et al, 2005**] Keymeulen D., Fink W., Ferguson M. I., Peay C., Oks B., Terrile R., Yee K. Evolutionary Computation applied to the Tuning of MEMS gyroscopes. // Proceedings of GECCO 2005, 2005.
- [**Keymeulen et al, 2006**] Didier Keymeulen, Michael I. Ferguson, Luke Breuer et al. Tuning of MEMS Gyroscope using Evolutionary Algorithm and "switched drive-angle" method // Proc. IEEE Aerospace Conference, 2006.
- [**Lee et al, 2004**] Lee Y., Park Y., Niu F., Bachman B., Gupta K. C., Filipovic D. Artificial neural network modeling of RF MEMS resonators // International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. 2004. №14(4).
- [**Li et al, 1998**] Li H., Antonsson E.K. Evolutionary Techniques in MEMS Synthesis // Proc. DETC'98, 1998 ASME Design Engineering Technical Conferences, 1998.
- [**Liang et al, 2001**] Liang Y. C., Lin W. Z., Lee H. P., Lim S. P., Lee K. H., Feng D. P. A neural-network-based method of model reduction for the dynamic simulation of MEMS // J. Micromech. Microeng. 2001. №11 (3).
- [**Litovski et al, 2004**] Litovski V., Andrejevic M., Zwolinski M. ANN based modeling, testing and diagnosis of MEMS (capacitive pressure transducer example) // Neural Network Applications in Electrical Engineering, 2004.
- [**Ma et al, 2001**] Ma L., Antonsson E.K. Robust Mask-Layout Synthesis for MEMS // Technical Proceedings Nanotech, 2001.
- [**Zhang et al, 2005**] Zhang Y., Kamalian R., Agogino A. M., Sequin C. H. Hierarchical MEMS Synthesis and Optimization // Proceedings of SPIE, vol. 5763. 2005.
- [**Zhou et al, 2001**] Zhou N., Zhu B., Agogino A. M. Pister K. S. J. Evolutionary Synthesis of MEMS MicroElectronicMechanical Systems Design // Proceedings ANNIE2001, 11, ASME Press, 2001.
- [**Zhou et al, 2002**] Zhou N., Agogino A. M., Pister, K. S. Automated Design Synthesis for Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) // Proc. of ASME Design Automation Conference, 2002.
- [**Zinchenko et al, 2008**] Zinchenko L., Radecker M., Bisogno F. A comparison of fitness function evaluation schedules for multi-objective univariate marginal distribution optimization of mixed analog-digital signal circuits // Proc. SPIE, vol. 7025, 2008.