

Методы оптимального размещения компонентов систем управления газотурбинными установками

С. Д. Альтшуль¹, С. В. Квашнин²

АО «НПФ «Система-Сервис»;

Кафедра АПУ

«СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

¹altshul@systserv.spb.su, ²kvashnin@systserv.spb.su

Д. Х. Имаев¹, Р. И. Смирнов², М. Ю. Шестопалов³

Кафедра АПУ

СПб ГЭТУ «ЛЭТИ»

¹damir.imaev@mail.ru, ²ri.smirnov.spb@gmail.com

³shestopalov_08@mail.ru

Аннотация. Обсуждаются задачи размещения компонентов систем автоматического управления газотурбинными энергетическими установками, функционирующими в условиях интенсивных физических воздействий механической, тепловой и электромагнитной природы. Приводятся метод и алгоритм оптимального размещения на плоскости с препятствиями, аппроксимируемыми прямоугольниками, а также в трехмерном пространстве. Приняты допущения о монотонном характере ослабления интенсивности поля при удалении размещаемого компонента от источника в изотропной среде.

Ключевые слова: система автоматического управления; компонент; размещение; воздействие; изотропная среда; интенсивность поля; газотурбинная установка

I. ВВЕДЕНИЕ

Системы автоматического управления газотурбинными энергетическими установками (газотурбинными электростанциями, газоперекачивающими агрегатами с газотурбинным приводом и др.) функционируют в условиях интенсивных воздействий механической, тепловой и электромагнитной природы, которые не только отрицательно влияют на качество процессов управления, но также способны привести к неисправности компонентов и отказам оборудования.

Активная отказоустойчивость систем управления (СУ) [1], [2], обеспечиваемая автоматическим реконфигурированием систем и реструктуризацией алгоритмов по результатам диагностирования неисправностей, весьма сложна в реализации.

Пассивная отказоустойчивость СУ достигается несколькими способами: специальной организацией причинно-следственной топологии систем по условиям инвариантности к воздействиям (создания путей компенсации и сильных контуров обратных связей на частотах возмущений) [11]; выбором информационно-алгоритмической структуры СУ (рациональным распределением вычислительных и коммуникационных ресурсов) [3], а также размещением компонентов СУ и элементов их соединений. Важнейшим способом повышения отказоустойчивости является размещение компонентов таким образом, когда

ослабляются причины потенциальных сигнальных неисправностей.

По тематике размещения имеется огромное множество публикаций с различными постановками задач (например, [4]–[6]).

В докладе рассматривается задача размещения компонентов СУ в ограниченном пространстве с запрещенными зонами по критерию минимального влияния поля физического воздействия. Приведены методы и алгоритмы оптимального размещения на плоскости с препятствиями, аппроксимируемыми прямоугольниками, и в трехмерном пространстве. Источник излучения и размещаемые компоненты рассматриваются как точки. Свойства изотропной среды определяются гипотезой о монотонном ослаблении интенсивности поля с удалением от источника, интенсивность излучения не зависит от направления, а препятствия не экранируют поле воздействий.

II. РАЗМЕЩЕНИЕ НА ПЛОСКОСТИ

Пусть рабочая область на плоскости и запретные зоны (препятствия) аппроксимируются так называемыми изотетическими прямоугольниками (со сторонами, параллельными осям координат). Необходимо поместить компонент СУ в допустимой области так, чтобы воздействие источника излучения было минимально.

С ростом числа компонентов и препятствий процедуру необходимо автоматизировать, что требует разработки алгоритмов оптимального размещения.

Принятые допущения позволяют сформулировать равносильную постановку задачи — максимизации расстояния размещаемого объекта от источника

$$\rho(M^*, M) = \sqrt{(x - x^*)^2 + (y - y^*)^2} \rightarrow \max,$$

где: ρ — расстояние в евклидовой метрике между источником $M^*(x^*, y^*)$ и размещаемым компонентом $M(x, y)$.

Легко показать, что решения принадлежат границам допустимой области, необходимо только уточнить, каким именно.

Рассмотрим некоторую ε -окрестность оптимальной точки $M_0(x_0, y_0)$

$$O_\varepsilon(M_0) = \{M \in D \mid \rho(M_0, M) < \varepsilon, \varepsilon > 0\}.$$

По определению локального максимума запишем:

$$\rho(M^*, (x_0, y_0)) \geq \rho(M^*, (x_0 + \delta x, y_0 + \delta y)),$$

где δx и δy — малые отклонения координат точки M_0 , причем $(x_0 + \delta x, y_0 + \delta y) \in O_\varepsilon(M_0)$.

Квадрат расстояния от источника до точки M_0 равен

$$\begin{aligned} \rho^2(M^*, (x_0 + \delta x, y_0 + \delta y)) &= (x_0 + \delta x - x^*)^2 + (y_0 + \delta y - y^*)^2 = (x_0 - x^*)^2 + 2(x_0 - x^*)\delta x + (\delta x)^2 + (y_0 - y^*)^2 + 2(y_0 - y^*)\delta y + (\delta y)^2 = \\ &= (\Delta x)^2 + 2\Delta x\delta x + (\delta x)^2 + (\Delta y)^2 + 2\Delta y\delta y + (\delta y)^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + 2\Delta x\delta x + 2\Delta y\delta y + (\delta x)^2 + (\delta y)^2, \end{aligned}$$

где $\Delta x = x_0 - x^*$, $\Delta y = y_0 - y^*$ — разности координат источника и оптимальной точки размещения.

Так как $(\delta x)^2$ и $(\delta y)^2$ являются малыми второго порядка, для существования максимума в точке $M_0(x_0, y_0)$ необходимо выполнение неравенства

$$\Delta x\delta x + \Delta y\delta y \leq 0. \quad (1)$$

Условие (1) означает, что максимумы расстояния принадлежат «внутренним» по отношению к источнику угловым точкам границы допустимой области.

Легко показать и достаточность условия. Проверим справедливость обратного утверждения. Допустим, что $M_0(x_0, y_0)$ не является точкой локального максимума. Тогда найдется точка $M_1(x_0 + \delta x, y_0 + \delta y) \in O_\varepsilon(M_0)$, для которой выполняется

$$\rho(M^*, (x_0, y_0)) \leq \rho(M^*, (x_0 + \delta x, y_0 + \delta y)).$$

Откуда следует

$$\Delta x\delta x + \Delta y\delta y \geq 0.$$

Но для всех точек окрестности $O_\varepsilon(M_0)$ выполняется условие (1). Противоречие показывает, что допущение неверно.

Алгоритм оптимального размещения на плоскости в изотропной среде распространения воздействий складывается из следующих шагов.

1. Сформировать множество вершин прямоугольников $\mathcal{V} = \{v_i(x_i, y_i)\}$. Положить $i = 1$.
2. Назначить δx и δy . Если точка с координатами $(x_i + \delta x, y_i + \delta y)$ принадлежит допустимой области, то перейти на 3, иначе на 5.
3. Если каждая из точек $(x_i, y_i + \delta y)$, $(x_i + \delta x, y_i)$ принадлежит каким-либо прямоугольникам, то перейти на 4, иначе на 5.
4. Добавить вершину v_i к элементам множества \mathcal{M} вершин, удовлетворяющих условию локальных максимумов (1) и перейти на 5.
5. Положить $i = i + 1$. Если $i \leq I = |\mathcal{V}|$, то на 2.

Число локальных максимумов конечно, что вытекает из конечности множества прямоугольников, аппроксимирующих допустимую область.

Таким образом, алгоритм, основанный на свойствах локальных оптимумов, позволяет решать задачу оптимального размещения путем перебора на конечных множествах. Для определения координат оптимальной точки размещения следует:

- 1 — перечислить множество локальных максимумов \mathcal{M} ;
- 2 — найти глобальный оптимум перебором на \mathcal{M} .

Одновременно локальные оптимумы ранжируются по расстоянию до источника, что предоставляет проектировщику некоторую свободу выбора.

Разработаны программа оптимизации и ранжирования локальных оптимумов.

Алгоритм оптимального размещения путем перебора на конечных множествах применим в случае, когда игнорируются размеры размещаемого компонента. Задача решается автоматически, если размеры компонентов СУ малы и не влияют на конфигурацию препятствий и условия размещения очередного компонента. В общем случае компонент с реальными габаритами создает препятствие, изменяющее конфигурацию допустимой области. Процедура размещения компонентов СУ представляется как взаимодействие человека и машины. После того, как найдена оптимальная точка размещения, проектировщик должен конкретизировать размеры компонента. Если габариты компонента не позволяют его размещение в точке глобального оптимума, то следует выбрать другую точку локального оптимума с меньшим приоритетом, т. е. ближе к источнику и т. д.

Разработаны программа оптимизации и средства визуализации, позволяющие последовательно размещать компоненты в интерактивном режиме.

Рис. 1 иллюстрирует рабочую область с препятствиями, где указаны точки локальных максимумов расстояния до источника.

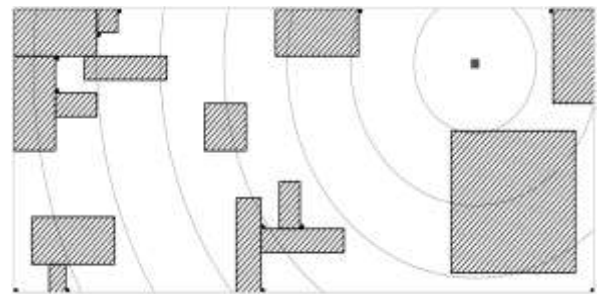


Рис. 1. Визуализация результата размещения на плоскости

III. РАЗМЕЩЕНИЕ В ТРЕХМЕРНОЙ СРЕДЕ

Постановка задачи оптимального размещения в трехмерном пространстве принципиально не отличается от задачи на плоскости.

Расстояние между источником $M^*(x^*, y^*, z^*)$ и оптимальной точкой $M_0(x_0, y_0, z_0)$ равно

$$\rho(M^*, M_0) = \sqrt{(x_0 - x^*)^2 + (y_0 - y^*)^2 + (z_0 - z^*)^2}.$$

По определению локального максимума $\rho(M^*, (x_0, y_0, z_0)) \geq \rho(M^*, (x_0 + \delta x, y_0 + \delta y, z_0 + \delta z))$,

где δx и δy — малые отклонения от точки M_0 . Квадрат расстояния равен

$$\begin{aligned} \rho^2(M^*, (x_0 + \delta x, y_0 + \delta y, z_0 + \delta z)) &= (x_0 + \delta x - x^*)^2 + (y_0 + \delta y - y^*)^2 + (z_0 + \delta z - z^*)^2 = (\Delta x)^2 + 2\Delta x\delta x + (\delta x)^2 + (\Delta y)^2 + 2\Delta y\delta y + (\delta y)^2 + (\Delta z)^2 + 2\Delta z\delta z + (\delta z)^2 = \\ &= (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2 + 2\Delta x\delta x + 2\Delta y\delta y + 2\Delta z\delta z + (\delta x)^2 + (\delta y)^2 + (\delta z)^2. \end{aligned}$$

Если учесть, что квадраты отклонений координат от рассматриваемой точки являются малыми второго порядка, то для существования максимума в точке $M_0(x_0, y_0, z_0)$ необходимо выполнение неравенства

$$\Delta x\delta x + \Delta y\delta y + \Delta z\delta z \leq 0. \quad (2)$$

Алгоритм оптимального размещения в трехмерной изотропной среде складывается из следующих шагов.

1. Сформировать множество вершин прямоугольных параллелепипедов.

$$\mathcal{V} = \{v_i(x_i, y_i, z_i); i = 1, 2, \dots, I\}; I = |\mathcal{V}|.$$

2. Положить $i = 1$. Назначить $\delta x, \delta y$ и δz .

3. Если точка $(x_i + \delta x, y_i + \delta y, z_i + \delta z)$ принадлежит допустимой области, то на 4, иначе на 6.

4. Если каждая из точек $(x_i + \delta x, y_i, z_i + \delta z)$, $(x_i, y_i + \delta y, z_i + \delta z)$, $(x_i + \delta x, y_i + \delta y, z_i)$ принадлежит какому-либо параллелепипеду, то на 5, иначе на 6.

5. Добавить вершину v_i к элементам множества \mathcal{M} вершин, удовлетворяющих условию локальных максимумов (2) и на 6.

6. Положить $i = i + 1$. Если $i \leq I$, то на 2.

На рис. 2 иллюстрируется пример оптимального размещения в пространстве. Программа изображает три проекции, а также аксонометрию рабочей области с указанием источника и локальных оптимумов.

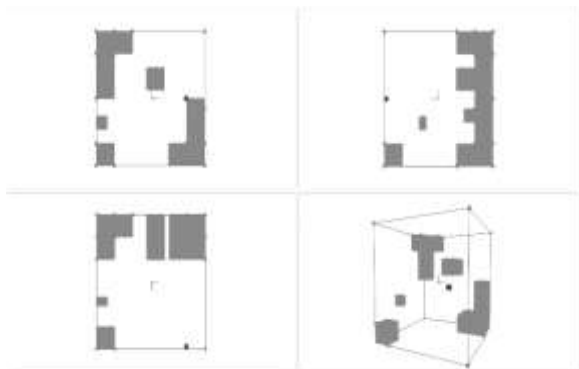


Рис. 2. Иллюстративный пример визуализации размещения в пространстве

В том случае, когда рабочая область и препятствия имеют произвольную конфигурацию, их следует аппроксимировать прямоугольниками или призмами, размеры (а следовательно, число) которых зависят от требуемой точности размещения. Это позволяет использовать описанный метод и программы оптимального размещения компонентов. Отметим, что достижение требуемой точности размещения приведет к росту числа локальных оптимумов.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пассивная отказоустойчивость систем управления газотурбинными энергоустановками, функционирующими в условиях интенсивных воздействий различной физической природы, достигается специальной организацией топологии систем по условиям инвариантности к потенциальным сигналам неисправностям [11], а также рациональным распределением вычислительных и коммуникационных ресурсов [3]. Важнейшим способом повышения отказоустойчивости является размещение компонентов и элементов соединений с таким расчетом, чтобы минимизировать причины неконтролируемого влияния среды.

По проблематике размещения опубликовано огромное количество работ (например, [8]–[10]). Вместе с тем, требуют дальнейшего развития методы разработки геометрических моделей и размещения компонентов распределенных систем автоматического управления, в частности, ориентированные на агрегаты компримирования природного газа.

Ставится целый ряд практически важных задач размещения компонентов в трехмерном пространстве при условиях: минимизации влияния излучений и ослабления взаимовлияния компонентов; размещения в анизотропной среде; моделирования эффекта экранирования излучений и размещения экранов для формирования полей излучений и др.

Необходимо дальнейшее развитие методов и алгоритмов оптимального размещения компонентов распределенных систем управления. К ним относятся методы и алгоритмы размещения компонентов территориально распределенных систем управления в случае произвольного числа источников воздействий с различными спектрами и интенсивностью с учетом чувствительности размещаемых компонентов к излучениям. Должны быть предложены методы сужения пространства решений на основе данных анализа причинно-следственной топологии динамических моделей, а также нахождения парето-оптимальных решений в случае многокритериальной оптимизации.

В настоящем докладе приведены результаты разработки методов, алгоритмов и программ оптимального размещения компонентов на плоскости, ограниченной прямоугольниками, а также в трехмерном пространстве. Приняты допущения о монотонном убывании интенсивности излучения с удалением от источника и изотропных свойствах среды распространения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Blanke M., Kinnaert M., Lunze J. and Staroswiecki M. Diagnosis and Fault Tolerant Control. Control Systems, vol. 2. London: Springer-Verlag, 2006. P. 227.
- [2] Шестопалов М.Ю. Системы отказоустойчивого управления технологическими процессами. СПб.: Изд-во «Элмор», 2013. С.308.

- [3] Альтшуль С.Д., Гайдаш Д.М., Квашнин С.В., Макаров А.Я., Черников А.В. МСКУ 5000 — Современная система управления газоперекачивающими агрегатами различных типов // Газотурбинные технологии. 2006, №4. С. 27–29.
- [4] Патент РФ №133883. Распределенная система автоматического управления газоперекачивающим агрегатом // С.Д. Альтшуль, Д.М. Гайдаш, Л.В. Зиндер, С.В. Квашнин, С.П. Прошовиков, А.В. Черников. Оpubл. 27.10.2013. Бюл. № 30.
- [5] Гайдаш Д.М., Квашнин С.В., Черников А.В. Интерактивные САУ на базе ПТК АИС-ОРИОН // Турбины и Дизели. 2017, №3. С. 28–33.
- [6] Альтшуль С.Д., Квашнин С.В., Селезнев М.Ф., Черников А.В. Комплексная система автоматического управления // Газотурбинные технологии. 2017, №8. С. 26–27.
- [7] Альтшуль С.Д., Квашнин С.В., Черников А.В., Гайдаш Д.М. Инновационная концепция проектирования САУ на базе узлов интерактивной сети // Турбины и Дизели, 2018, №3. С. 12–15.
- [8] Стоян Ю.Г., Яковлев С.В. Математические модели и оптимизационные методы геометрического проектирования. Киев: Наук. думка, 1986. С. 265.
- [9] Забудский Г.Г. Алгоритм решения минимаксной задачи размещения объекта на плоскости с запрещенными зонами // Автомат. и телемех. Вып. 2, 2004. С. 93–100.
- [10] Фокс А., Пратта М. Вычислительная геометрия. Применение в производстве и проектировании. М.: Мир, 1982. С. 304.
- [11] Шестопалов М.Ю. Имаев Д.Х., Кораблев Ю.А., Квашнин С.В. Проектирование систем управления территориально распределенными объектами // Инновации, 2018. № 10. С. 100–107.