

А. Н. Миляшов, В. А. Матюшин

МЕСТО И ЗНАЧЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ КАК ОДНОГО ИЗ ОСНОВНЫХ ЭТАПОВ В СТРУКТУРЕ СОВРЕМЕННЫХ САПР

Ключевые слова: Проектирование механотронных систем, параметрическая оптимизация механотронных систем, САПР механотронных систем, задача параметрической оптимизации системы на силовой основе преобразователь частоты - асинхронный двигатель.

Задача параметрической оптимизации, применительно к механотронным системам, имеет ряд особенностей как с точки зрения ее постановки так и с точки зрения выбора методов ее решения. Раскрывается этап проектирования включающий параметрическую оптимизацию эскизного проекта с проведением оптимизационного поиска по условиям технического задания.

Keywords: Designing mechatronic systems, parametric optimization of mechatronic systems, CAD systems for mechatronic systems, the problem of parametric optimization of the system based on the power inverter - induction motor.

The problem of parametric optimization in respect of the mechatronic system has a number of features in terms of both its formulating and selecting the methods for its solution. Revealed is the step of designing including the parametric optimization of conceptual design with carrying optimization search according to the technical specifications.

Характерной тенденцией последнего десятилетия являются значительные изменения в структурах и функционировании электромеханических устройств и комплексов, что при возрастающих возможностях современной вычислительной техники показывает необходимость постоянного пересмотра традиционных методов численного исследования и моделирования процессов в них [1]. В процессе проектирования сложных систем исследователь и ЭВМ все чаще объединяют свои возможности для решения задачи создания новых концепций исследования, требующих оригинальных подходов. Применительно к системам электропривода проблемы, встречающиеся на этом пути, связаны со сложной схемной структурой и объемной конструкцией исследуемых объектов, с нелинейностью характеристик материалов и элементов, с функционированием в переходных и установившихся режимах [2].

Многие из названных проблем способны решить системы автоматизированного проектирования (САПР). Эти системы представляют собой совокупность технических средств, программного, информационного, методического и организационного обеспечения, позволяющую выполнять проектирование и исследование в диалоговом режиме с автоматизацией расчетных и логических операций, с использованием баз данных и знаний и с достаточным уровнем сервиса для принятия решений [3]. Это определение в сжатом виде отражает основополагающую концепцию создания и эксплуатации САПР.

Внедрение методов современных САПР позволяет найти ключ к разработке средств расчета, а также концепций оптимизации классических структур электротехнических устройств, и создает возможности для предварительной разработки новых прототипов исследований. В настоящее время САПР широко используются на предприятиях и в научных лабораториях при проектировании и исследовании электромеханических систем и

комплексов, а также устройств силовой электроники и преобразовательной техники [4]. Однако их возможности в значительной мере ограничены эффективностью разработанных для их целей вычислительных систем. Постоянное развитие и совершенствование средств современной вычислительной техники дает возможность непрерывной модификации классических методов проектирования и исследования на различных этапах САПР. Не менее важным для САПР является разработка новых или применение эффективных, но не используемых ранее для данного электротехнического устройства методов исследования.

Исторически проблема автоматизации проектирования электротехнических устройств возникла с появлением первого поколения ЭВМ. На территории бывшей СССР, так же как и за рубежом, первые работы по автоматизации проектирования электрических машин были начаты в 50-х годах. Под руководством Б.М. Кагана и Т.Г. Сорокера проектные расчеты асинхронных двигателей массового производства начали впервые выполняться на ЭВМ. За время прошедшее с тех пор, работы по автоматизации проектирования достигли такого развития, что уже в 90-е годы прошлого века только в России функционировало несколько десятков САПР различных по структуре систем электромеханики. Для проектирования систем электропривода с полупроводниковыми цепями питания и управления (МТС) разработан обширный класс пакетов САПР, основным преимуществом которых является гибкость и простота синтеза новых схем. Однако большинство САПР основано на методиках проектирования, использующих для электрической машины метод гармонического баланса и для полупроводниковых цепей метод средних значений. Такие системы проектирования, как правило, упрощено учитывают особенности работы и конструкции данного вида электропривода (параметры и схему цепей питания и управления, дискретность переключения фаз,

насыщение магнитопровода машины, несимметрию обмоток, эксцентриситет ротора, люфт и др.), что приводит к значительным погрешностям уже на этапе предварительных оценочных расчетов рабочей точки. Создание и введение в САПР современных математических моделей МТС на основе систем нелинейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, обладающих наибольшей адекватностью реальным физическим процессам динамики электропривода, позволяет проводить уточненные расчеты характеристик привода. Однако и в этом случае технические характеристики и параметры проектируемой МТС часто оказываются далекими от оптимальных. Поэтому в современных САПР МТС возрастает роль этапа параметрической оптимизации, и его структура и содержание (использование тех или иных методов, моделей и алгоритмов) во многом определяет эффективность итоговых результатов всего проектирования.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что современные средства вычислительной техники позволяют поднять САПР на новый качественный уровень. Одним из самых эффективных путей решения задачи проектирования МТС здесь является создание САПР на основе применения на различных этапах проектирования новых математических моделей и методик их исследования, обладающих как максимальной адекватностью, так и максимальной «комфортностью» для исследователя.

Процесс создания САПР в настоящее время упорядочен на основе стандартов [5], в которых установлены следующие стадии разработки [6]: 1) предпроектные исследования, направленные на определение первоочередных задач; 2) разработка технического задания, определяющего цель и назначение САПР; 3) разработка технического предложения, содержащего обоснование и выбор структурного варианта и уточнение технического задания; 4) разработка эскизного проекта, содержащего обоснование и выбор принципиальных решений по реализации структуры; 5) разработка технического проекта; 6) разработка рабочего проекта, содержащего проектную документацию; 7) изготовление, отладка и испытание; 8) ввод в действие.

Независимость стандартных этапов проектирования относительно объектов проектирования не позволяет четко разграничить задачи, решаемые на отдельных этапах, поэтому для автоматизированных форм проектирования более предпочтительной является структура, отражающая характер решаемых задач:

1. Этап структурно-параметрического (внешнего) проектирования. При проектировании МТС на этом этапе производится формирование технического задания, осуществляется поиск и анализ потенциальных возможностей построения системы, новых структур и технических средств, а также окончательный аргументированный выбор схемных решений всех звеньев электропривода.

2. Этап функционально-параметрического (внутреннего) проектирования. Здесь производится выработка эскизного проекта и создание макета системы, имеющего удовлетворяющие заданию характеристики. Этап подразумевает также выработку предварительных данных по допускам на параметры объекта с целью дальнейшего уточнения конструкции, а также ценность отдельных характеристик, описывающих систему качественно.

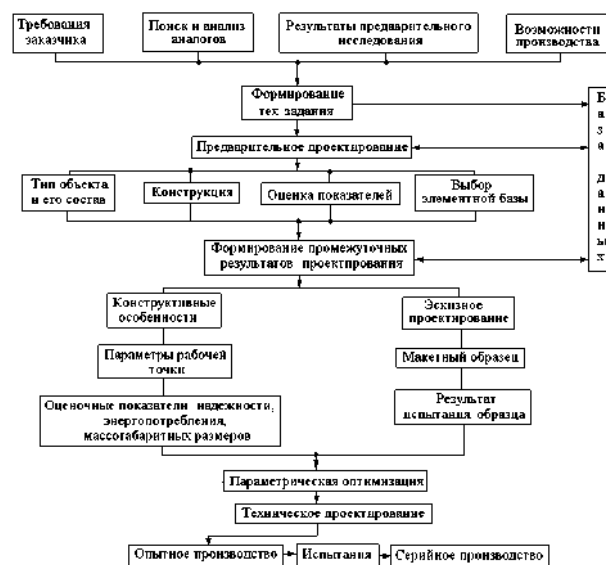


Рис. 1 – Структура и основные этапы САПР ЭП

При проектировании МТС на данном этапе используются известные инженерные методики расчета всех звеньев, входящих в состав системы (управляемого выпрямителя УВ, фильтра Ф, преобразователя частоты ПЧ и асинхронного двигателя АД). Исходными данными для каждой из используемых методик являются вектора-задания вида $\bar{Y}(x_i)$, где x_i – исходные данные, формируемые для каждого отдельного расчета по выбранной методике из известных данных технического задания сформулированного на предыдущем этапе (номинальная мощность, напряжение, частота, синхронная скорость, схема соединения обмоток и др.). Следует отметить, что i – количество исходных заданных величин, входящих в вектор-задание может меняться в соответствии с техническим заданием и используемой методике. Так, например, конструктивный расчет асинхронного электродвигателя может быть выполнен полностью или в заданных габаритах какой либо серийной машины (с известными параметрами магнитопровода).

Этап подразумевает в своем составе также проведение оптимизационных расчетов (см. гл. 3), являющихся одним из наиболее важных и сложных элементов САПР. Необходимым условием для проведения оптимизации является наличие специальных баз данных и промежуточных данных проектирования, максимально адаптированных к введению в разработанную математическую модель МТС, поэтому некоторые данные этого этапа проектирования МТС представляются в виде

вектора промежуточных результатов. Известно [7, 8], что при проведении расчетов отдельных элементов системы (даже с учетом их оптимизации), комплексные показатели всей системы оказываются значительно хуже (до 40%) относительно ожидаемых. Однако проведение таких расчетов необходимо для формирования базы промежуточных результатов и позволяет оценить параметры базовой точки системы. Эти промежуточные результаты в дальнейшем являются исходными для задачи параметрической оптимизации. В качестве промежуточных результатов в данном случае могут выступать параметры питающей сети, схемы замещения АД в области рабочей точки, параметры фильтра в звене постоянного тока, а также нелинейная зависимость, учитывающая насыщение магнитопровода:

$$\bar{Z}(U_m, f_c, R_n, L_n, R_\phi, L_\phi, R_s, L_s, R_r, L_r, M, M(I)).$$

Необходимо отметить, что в связи с большой дискретностью номинальных параметров силовых коммутирующих элементов (транзисторов, тиристоров и диодов) в звене управляемого выпрямителя и инвертора, а также диаметров обмоточных проводов, их окончательный выбор обычно производится также на этом этапе на основании результатов инженерных расчетов.

Параметрическая оптимизация эскизного проекта (рис. 1), структурно входящая в данный этап проектирования, подразумевает проведение оптимизационного поиска по условиям технического задания. Здесь формируется задача оптимизации, определяются исходные данные (вектора \bar{A} и \bar{B}), параметрические и функциональные ограничения.



Рис. 2 – Параметрическая оптимизация эскизного проекта

С математической точки зрения оптимизационной задачей является минимизация критерия оптимальности (функции цели) вида: $J(\bar{A}, \bar{B}, \bar{X}) \rightarrow \min$, где

$\bar{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_m)$ - вектор независимых и зависимых переменных, при заданных ограничивающих условиях вида $G_i(\bar{X}, \bar{A}) \geq 0$, $H_j(\bar{X}, \bar{A}) = 0$.

Причем \bar{X} выбирается при проектировании таким образом, чтобы с учетом ряда заданных

величин \bar{A} полностью определить исследуемые характеристики системы.

Так для МТС в качестве вектора исходных данных \bar{A} и вектора выбранных постоянных величин \bar{B} приняты следующие параметры:

1. Параметры источника:

- U_c – действующее значение питающего напряжения,
- f_c – частота питающей сети,
- R_n – активное сопротивление источника,
- L_n – индуктивность источника.

2. Выходные параметры электропривода:

- P_2 – номинальная выходная мощность электропривода,
- n_1 – синхронная частота вращения магнитного поля,
- J – момент инерции рабочего механизма,
- T_n – срок службы электропривода,
- t – количество часов работы электропривода в год.

3. Параметры токовой нагрузки:

- P_1 – потребляемая электроприводом активная мощность,
- j – допустимая плотность тока в катушке индуктивности фильтра.

4. Геометрические и конструкционные параметры электродвигателя:

- параметры статора: k_0 – обмоточный коэффициент статора, m – количество фаз статора, p – число пар полюсов, ρ_m – удельное сопротивление материала обмотки при расчетной температуре, l_{cp} – средняя длина полувитка, Q – число пазов на полюс, l_s – длина пакета статора, λ_{ns} – коэффициент удельной магнитной проводимости пазового рассеяния статора, λ_{ls} – коэффициент удельной магнитной проводимости лобового рассеяния статора, λ_{ds} – коэффициент удельной магнитной проводимости дифференциального рассеяния статора, $k_{\delta r}$ – коэффициент воздушного зазора, C_l – коэффициент зубчатости статора, δ – воздушный зазор, D – внутренний диаметр статора;
- параметры ротора: Z_R – число пазов ротора, k_{0R} – обмоточный коэффициент ротора, ρ_R – удельное сопротивление материала «беличьей клетки», $S_{ст}$ – сечение стержня, $l_{ст}$ – длина стержня, $D_{кл}$ – средний диаметр кольца, a и b размеры кольца в осевом и радиальном направлениях, $k_{ск}$ – коэффициент скоса, $\lambda_{ск}$ – коэффициент удельной магнитной проводимости скоса ротора.

5. Магнитные свойства магнитопровода, определенные зависимостью $M(I)$:

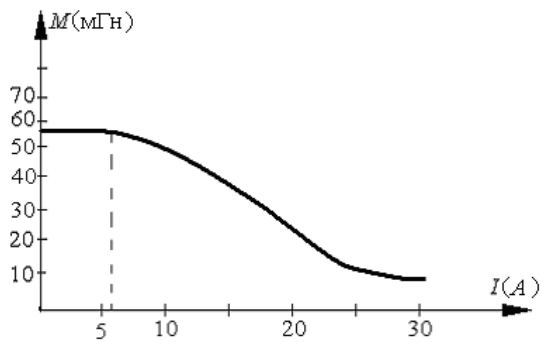


Рис. 3 – Зависимость взаимной индукции M от тока фазы статора I

Кроме того, в качестве заданных данных – вектора \vec{B} используются принципиальные электрические схемы УВ, Ф и ПЧ и параметры их силовых коммутирующих элементов, которые в связи с их физической дискретной реализацией в процессе оптимизации измениться не могут, а также данные о параметрах схемы замещения силовой основы оптимизируемой МТС асинхронного двигателя.

1. Принципиальная схема и параметры коммутирующих элементов управляемого выпрямителя:

- R_{VD} , R_{VS} – активные внутренние сопротивления диода и тиристора, включенных в прямом направлении,
- $C_{УВ}$ – стоимость управляемого мостового выпрямителя.

2. Принципиальная схема и конструктивные параметры фильтра:

- ПЭТМ-155 – марка провода катушки фильтра,
- $S_{пр}$ – сечение провода катушки фильтра,
- К50-35 22, 33, 47, 100, 150, 180, 220, 330, 470, 560 и 680 мкФ – тип и номиналы электролитических алюминиевых конденсаторов,
- $U_{раб}$ – рабочее напряжение конденсатора,
- $U_{доп}$ – амплитуда переменной составляющей напряжения на выходе фильтра при частоте 100 Гц.

3. Принципиальная схема и конструктивные параметры преобразователя частоты:

- R_{vm} – активное сопротивление идеального коммутатора,
- $C_{ПЧ}$ – стоимость преобразователя частоты.

4. Схема замещения симметричного трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и параметры базовой точки:

- R_s – активное сопротивление статора базовой точки,
- R_r' – активное сопротивление ротора базовой точки, приведенное к обмотке статора,
- L_s – индуктивность рассеяния статора базовой точки,
- L_r' – индуктивность рассеяния ротора базовой точки, приведенное к обмотке статора,
- M – взаимоиндукция базовой точки,

- S_s – сечение провода обмотки статора для базовой точки,
- k_s – допустимый коэффициент заполнения проводом паза статора,
- ΔP_c – потери в стали при холостом ходе двигателя для базовой точки,
- C_d – стоимость асинхронного электродвигателя для базовой точки.

5. Экономические параметры:

- C_p – цена установленной мощности компенсаторов реактивной энергии за год,
- $k_{загр}$ – коэффициент загрузки компенсаторов,
- $C_{Г}$ – цена за 1 кВт·час в расчетном году,
- $C_{кондi}$ – цена электролитических алюминиевых конденсаторов в расчетном году,
- C_m – цена 1 кг меди в расчетном году.

В качестве вектора независимых переменных \vec{X} могут быть приняты параметры фильтра (число витков w , диаметр провода дросселя и емкость C) и число витков на паз АД. Ограничивающими условиями задачи являются ограничение на амплитуду переменной составляющей напряжения конденсатора $U_{доп}$, на действующее значение потребляемого из сети тока I_d , а также на величину индуктивности фильтра L_f .

Оптимизационный поиск производится посредством последовательного обращения к математической модели по заранее заданному алгоритму с использованием специально сформированных баз данных. Следует отметить, что данный этап структурно делится еще на 3 подэтапа. Его итоговым результатом является создание документации на уточненную конструкцию системы, а также результаты испытаний опытного образца.

3. Этап конструкторско-технологического проектирования подразумевает выбор технологических процессов изготовления и компоновки, а также правил эксплуатации. Здесь производится тщательная проработка всех схемных, конструкторских и технологических решений, фиксируемых в техническом проекте системы и составляется полная проектная документация.

Литература

1. Макаров В.Г. Актуальные проблемы асинхронного электропривода и методы их решения / В.Г. Макаров // Вестник Казанского технологического университета. Т. 14.- 2011.-№6.-С.79-93.
2. Макаров В.Г. Анализ современного состояния теории и практики асинхронного электропривода / В.Г. Макаров // Вестник Казанского технологического университета. Т. 14.- 2011.-№6.-С.109-120.
3. Афанасьев А.Ю. Инвариантное программное обеспечение САПР электрических машин малой мощности / А.Ю. Афанасьев, И.А. Вахитов, И.И. Провирнин, В.И. Стурай // Системы и элементы электрооборудования летательных аппаратов: сб. КАИ. - 1987. – С. 110
4. Флоренцев С.Н. Силовая электроника начала тысячелетия / С.Н. Флоренцев // Электротехника. – 2003. - №6. - С. 3-9.

5. ГОСТ 23501.101-87. САПР. Основные положения. – Введ. 1988-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 10 с.
6. Аветисян Д.А. Основы автоматизированного проектирования электромеханических преобразователей / Д.А. Аветисян. – М.: Высшая школа, 1988. – 271 с.
7. Миляшов Н.Ф. Электромеханотронная система с асинхронным двигателем и автогенераторным управлением: дис. ... докт. тех. наук: 05.09.03 / Н.Ф. Миляшов – Казань., 1999. – 392 с.
8. Лопухина Е.М. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности / Е.М. Лопухина, Г.А. Семенчуков – М.: Высшая школа, 2002. – 511 с.

© **А. Н. Миляшов** – канд. техн. наук, доц. каф. электропривода и электротехники КНИТУ; **В. А. Матюшин** – асп. той же кафедры, vladimir-kzn@mail.ru.