

магнитного поля зубцовой зоны и коэффициента χ от магнитного потокосцепления ψ для различных значений электрического угла.

Значения χ можно использовать для расчета динамического момента по уравнению (13). Важно, что определение χ проводится на основе статических расчетов магнитной цепи, поэтому для моделирования динамических процессов возможно создание базы значений χ , которые легко использовать для расчета динамического момента. Выражение (13) можно использовать при моделировании динамических процессов в индукторных машинах, например в системе Matlab-Simulink, а также для регистрации динамического момента индукторной машины в процессе испытаний или эксплуатации вентильно-индукторного привода. В последнем случае достаточно регистрировать только ток I и ЭДС фазы машины E ($E = \frac{dy}{dq}$). Потокосцепление ψ и $\frac{dI}{dq}$ могут быть определены в процессе текущих вычислений.

Вывод. Предлагаемый метод расчета динамического момента индукторной машины позволяет учитывать насыщение магнитной цепи машины без

текущих расчетов магнитной цепи. Необходимые для уточненного расчета динамического момента коэффициенты определяются на основе предварительных статических расчетов магнитной цепи машины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уайт Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. – М.: Энергия, 1964.
2. DiRenzo M.T. Switch Reluctance Motor Control – Basic Operation and Example Using the TMS320F240. – Texas Instruments, Application Report SPRA420A, February 2000.
3. Электрические и электронные аппараты: Учебник для вузов/Под ред. Ю.К. Розанова. 2-е изд., испр. и доп. – М: Информэлектро, 2001.
4. Кузнецов В.А., Кузмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели. – М.: Изд-во МЭИ, 2003.

Авторы: Баль Владимир Борисович окончил электромеханический факультет МЭИ в 1976 г. В 1982 г. в МЭИ защитил кандидатскую диссертацию «Разработка и исследование линейных шаговых электродвигателей». Доцент кафедры электромеханики НИУ «МЭИ».

Тан Тхун Аунг (Мьянма) окончил магистратуру МЭИ в 2010 г. Аспирант кафедры электромеханики НИУ «МЭИ».

* * *

Многокритериальная оптимизация асинхронных двигателей с учётом динамики в программной среде MATLAB

АМБАРЦУМОВА Т.Т., ЛЕ КУАНГ КЫОНГ

В программной среде Matlab реализован метод многокритериальной поисковой оптимизации, основанный на использовании ЛПР-последовательности. В сочетании с универсальной многоконтурной макромоделью асинхронного двигателя метод позволяет решать большой класс задач системного моделирования асинхронных машин с учётом динамики.

В сочетании с регрессионной моделью программный продукт может быть использован для любого типа электромеханических устройств.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, оптимизационный метод, макромодел, структурная схема

Актуальной проблемой в решении задач анализа и синтеза электромеханических устройств является многокритериальная оптимизация. Существенную роль при разработке многоконтурных асинхронных машин с учётом динамики и многообразия физических процессов может сыграть использование алгоритмов многокритериальной оптимизации. Они

A method of multicriterion search optimization based on using the LP sequence is implemented in the Matlab software environment. Taken in combination with a universal multiloop macromodel of an asynchronous motor, the proposed method opens the possibility for solving a wide range of problems relating to system simulation of asynchronous machines taking their dynamics into account. The software product taken in combination with a regression model can be used for any type of electromechanical devices.

Key words: asynchronous motor, optimization method, macromodel, block diagram

хорошо согласуются с концепцией экспертных систем, предполагающей наличие базы знаний и интерактивный режим работы лица, принимающего решение.

В задачах проектирования электромеханических устройств хорошо зарекомендовал себя метод многокритериальной поисковой оптимизации, осно-

ванный на использовании ЛПт-последовательности [1]. Метод, заключающийся в зондировании пространства параметров, называют ЛПт-поиском. В качестве пробных точек используются точки ЛПт-последовательностей, наиболее равномерно распределённые среди всех известных в настоящее время последовательностей.

Ряд задач оптимизации статических и динамических режимов асинхронных двигателей решался на основе оптимизационного ЛПт-метода с использованием FORTRAN-программ [2].

Учитывая возможности современной вычислительной техники и средств программирования, предлагается реализация оптимизационного метода ЛПт в программной среде Matlab, в которой создан программный комплекс на основе универсальных моделей динамики асинхронных двигателей.

Учитывая, что оптимизационный метод ЛПт предполагает создание в каждом случае для модели оптимизируемого объекта программы связи модели объекта с алгоритмом оптимизационного метода, разработан также универсальный алгоритм связи оптимизационного метода с регрессионной моделью, получаемой методом планирования эксперимента.

Подобный подход позволяет решать оптимизационные задачи с использованием ЛПт-последовательности для любого типа устройств, имеющих регрессионные модели, без предварительного создания программы связи с методом. Это даёт возможность существенно расширить границы применения метода.

При создании алгоритмов макро моделирования асинхронных машин с учётом динамики актуальной задачей является использование многоконтурной модели. Электрическая машина рассматривается как совокупность взаимодействующих электрических цепей, находящихся в относительном движении. Второй роторный контур может быть использован при моделировании двухклеточного двигателя, может также рассматриваться как интегральный контур вихревых токов. Введение второго контура в статорной цепи позволяет моделировать динамические режимы с учётом вихревых токов в магнитопроводе статора. Кроме того, существует ряд публикаций о возможности создания асинхронной машины с автокомпенсацией реактивной мощности за счёт многоконтурности статора.

Универсальная макро модель включает блоки моделирования асинхронной машины в системе координат a, b и фазовой заторможенной системе координат. Модель также включает алгоритмы определения составляющих полной мощности в динамических режимах, использующих токи и напряжения в данный момент времени. Реализована модель с помощью подпрограмм, написанных на языке Matlab и C, с использованием программного пакета Matlab-Simulink, где исследуемый объект создаётся путём графической сборки схемы соединённых элементарных стандартных звеньев [3].

Структурная схема моделирования асинхронного двигателя с учётом динамических режимов на основе универсальной модели приводится на рис. 1.

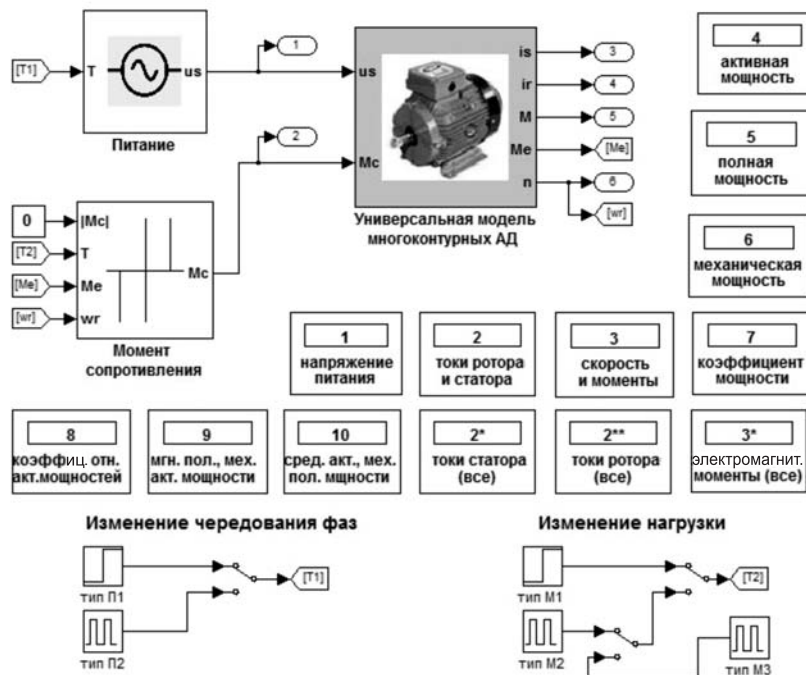


Рис. 1. Структурная схема моделирования асинхронного двигателя с учётом динамических режимов на основе универсальной модели

Схема алгоритма оптимизационного расчёта асинхронного двигателя с учётом динамики (рис. 2) состоит в следующем. После ввода исходных данных, поискового и поверочного расчёта асинхронного двигателя в статическом режиме проводится генерация исходных данных для оптимизационных расчётов динамических режимов. Задаются функциональные ограничения, начальный и конечный номера испытаний, число варьируемых параметров. Пробная точка выбирается с помощью ЛПт-последовательности и рассчитывается в подпрограмме FunCal, исходными данными которой являются входной массив критериев, значения критериальных ограничений. Здесь содержатся только операторы присвоения значений критериев переменным, а непосредственно расчёт критериев ведётся в блоке динамики. После расчёта пробной точки происходит накопление значений критериев и соответствующих номеров испытаний.

В результате анализа таблиц испытаний выбираются критериальные ограничения и осуществляется проверка непустоты множества допустимых моделей. В случае, если ни одна модель не попала в допустимую область, следует вернуться к предшествующему этапу расчёта и потребовать уступок при назначении критериальных ограничений; если такие уступки невозможны, то необходимо вернуться к начальному этапу и увеличить число пробных точек. Затем определяется множество допустимых моделей и оптимальных по Парето, выводятся характерные величины переходного процесса и значения критериев на печать.

При решении конкретных оптимизационных задач бывает целесообразно не ограничиваться определением Парето-оптимальных моделей, а использовать также оптимизационный метод попарных сопоставлений, что отражено в структурной схеме. Этапы оптимизационного расчёта снабжены средствами визуального программирования.

В качестве примера на основе разработанных программных средств приводятся результаты оптимизационного расчёта для двигателя мощностью 3 кВт (4A100S4Y3) со следующими данными: $R_{1s} = 1,51$ Ом; $R_{2s} = 151$ Ом; $l_{1ss} = 0,018$ Гн; $l_{2ss} = 0,093$ Гн; $M = M_s = M_r = 0,230$ Гн; $R_{1r} = 1,83$ Ом; $R_{2r} = 80$ Ом; $l_{1sr} = 0,022$ Гн; $l_{2sr} = 0,102$ Гн; $m = 3$; $p = 2$; $J = 0,035$ кгм²; $u_{As} = 310 \cos 314t$; $u_{Bs} = 310 \sin(314t + 2\pi/3)$; $u_{Cs} = 310 \sin(314t - 2\pi/3)$.

Модель асинхронного двигателя содержит два контура на статоре и два на роторе, расположенных по одной оси в фазной заторможенной системе координат. Здесь второй роторный контур – интегральный контур роторных вихревых токов. Параметры контура определены по методике [4]. Во втором статорном контуре выделен контур по-



Рис. 2. Схема алгоритма оптимизационного метода ЛПт

ть в стали статора. Параметры определены на основе «методики снятия частотных характеристик» [5, 6].

Число варьируемых параметров 10 (активное сопротивление первого контура статора R_{1s} , индуктивность рассеяния первого контура статора l_{1ss} , активное сопротивление второго контура статора R_{2s} , индуктивность рассеяния второго контура статора l_{2ss} , активное сопротивление первого контура ротора R_{1r} , индуктивность рассеяния первого контура ротора l_{1sr} , активное сопротивление второго контура ротора R_{2r} , индуктивность рассеяния второго контура ротора l_{2sr} , взаимная индуктивность между контурами статора и ротора M , момент инерции J). Диапазон изменения варьируемых параметров $\pm 20\%$ показанных значений. Число испытаний 64; число критериев 8 (время разбега; максимальное значение электромагнитного момента; среднее значение коэффициента мощности за время пуска; среднее значение отношения активных мощностей за время пуска; максимальное мгновенное значение A -фазного тока первого контура статора; максимальное мгновенное значение A -фазного тока второго контура статора; максимальное мгновенное значение a -фазного тока первого контура ротора; максимальное мгновенное значение a -фазного тока второго контура ротора); число решающих критериев 2 (время разбега; максимальное мгновенное значение A -фазного тока первого контура статора).

На основе выбранных критериальных ограничений определялись параметры Парето-оптимальных моделей. Для решающих критериев: времени разбега 0,13 с и максимального мгновенного значения A -фазного тока первого контура статора 36,9 А получены следующие значения параметров: $R_{1s} = 1,55$ Ом; $R_{2s} = 132$ Ом; $l_{1ss} = 0,017$ Гн; $l_{2ss} = 0,105$ Гн; $M = M_s = M_r = 0,213$ Гн; $R_{1r} = 1,97$ Ом; $R_{2r} = 94$ Ом; $l_{1sr} = 0,023$ Гн; $l_{2sr} = 0,084$ Гн; $J = 0,031$ кгм²;

Метод многокритериальной оптимизации, основанный на использовании ЛПт-последовательно-

сти, применим для широкого класса задач анализа и синтеза электромеханических устройств и хорошо согласуется с концепцией экспертных систем.

Разработанные программные средства реализации оптимизационного метода с использованием ЛПт-последовательности в программной среде Matlab на основе универсальных моделей динамики асинхронных двигателей могут быть использованы при проектировании различных многоконтурных машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. — М.: Наука, 1981.
2. Копылов И.П., Амбарцумова Т.Т., Кузьмишкина Н.П. Оптимизационное проектирование асинхронных двигателей с учётом электромеханического преобразования энергии в динамике. — Изв. вузов. Электромеханика, 1990, № 8.
3. Амбарцумова Т.Т., Ле Куанг Кыонг. Макромоделирование многоконтурных асинхронных двигателей в среде MATLAB-Simulink. — Изв. вузов. Электромеханика, 2012, № 1.
4. Копылов И.П., Амбарцумова Т.Т. Влияние вихревых токов ротора на динамические характеристики асинхронной машины. — Электротехника, 1976, № 11.
5. Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1962.
6. Копылов И.П., Амбарцумова Т.Т., Арьянова С.А. Динамические режимы асинхронной машины с учётом вихревых токов. — Электротехника, 1980, № 7.

Авторы: Амбарцумова Татьяна Трофимовна окончила МЭИ в 1963 г. по специальности «Электрические машины и аппараты». Кандидатскую диссертацию «Вращающий момент асинхронной машины с учетом вихревых токов» защитила в 1976 г. в МЭИ. Доцент кафедры электромеханики НИУ «МЭИ».

Ле Куанг Кыонг окончил Ханойский политехнический институт (СРВ) в 1996 г. по специальности «Электрические машины и устройства» (степень инженер), в 2002 г. по специальности «Автоматизация и управление» (степень магистр техники и технологии), в 2006 г. по специальности «Информатика» (степень инженер). Аспирант кафедры электромеханики НИУ «МЭИ».