

# ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 62-83::621.313.3

## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ\*

Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, С.П. Лохов, А.М. Журавлев  
г. Челябинск, Южно-Уральский государственный университет

## PARAMETRIC OPTIMIZATION OF VARIABLE FREQUENCY ELECTRIC DRIVES

Y.S. Usynin, M.A. Grigoryev, A.N. Shishkov, S.P. Lokhov  
Chelyabinsk, South Ural State University

Предложена методика многокритериальной поэтапной оптимизации электроприводов с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения (СРМНВ). На начальном этапе минимизировались удельные затраты на компоненты электропривода путем их перераспределения между активными частями двигателя и полупроводникового преобразователя, далее достигались максимальные удельные моменты за счет изменения геометрии машины и с учетом совместной работы преобразователя и двигателя, наконец, на последнем этапе оптимизировались структура и параметры системы управления с позиции достижения максимальной точности.

*Ключевые слова:* многокритериальная оптимизация, электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения.

The methodology of multicriterion step-by-step optimization of electric drives with synchronous reluctance independent excitation machine is suggested. At the initial stage the specific costs for the electric drive components have been minimized by their redistribution between the reactive parts of the motor and semiconducting converter, then the maximum specific torques have been achieved by means of changes of the machine geometry and with account of the combined actions of converter and motor and, finally, at the final stage the structure and control system parameters have been optimized achieving the maximum accuracy.

*Keywords:* multicriterion optimization, electrical drives with synchronous reluctance independent excitation machine.

**Введение.** В настоящее время наибольший прогресс в современных регулируемых электроприводах наблюдается в приводах переменного тока и идет он, главным образом, за счет совершенствования преобразователей и в меньшей степени – за счет электродвигателей. Между тем, если обратить большее внимание на новые типы электрических машин и в комплексе «преобразователь–двигатель» проектировать не преобразователь под традиционный двигатель с синусоидальным напряжением на статоре, а попытаться при конструировании электропривода учесть особенности совместной работы электродвигателя с пре-

образователем, то можно добиться хороших результатов.

**Методика оптимизации.** Для разработки методики оптимизации воспользуемся известными положениями теории электромеханического преобразования энергии, методами оптимального проектирования (анализ монотонности, методом объединения, частичной инвариантности, метод золотого сечения, метод неопределенных множителей Лагранжа), наконец, на последнем этапе частотными методами синтеза структур управления.

Как известно, электромагнитный момент  $M_i$ , создаваемый  $i$ -гармоникой магнитодвижущих сил

\* Работа выполняется в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (госконтракт П 1135 от 2 июня 2010 г. Высоконадежные энергосберегающие комплексы на основе новых типов вентильных электроприводов и обеспечение их безопасности).

$F_{Ai}, F_{Bi}$  (МДС), пропорционален их векторному произведению [1]:

$$M_i = \frac{m}{2R} |F_{Ai} F_{Bi}| = \frac{m}{R} S_i.$$

Здесь  $m$  – число фаз,  $R$  – магнитное сопротивление потоку в электрической машине,  $F_{Ai}, F_{Bi}$  – амплитудные значения  $i$  гармоник МДС, создаваемых обмотками, расположенными над полюсом и над межполюсными промежутком соответственно,  $S_i$  – площадь треугольника, образованного векторами-слагаемыми  $F_{Ai}, F_{Bi}$  и  $F_i$  – вектором-суммой. Необходимо обратить внимание на геометрический смысл выражения для электромагнитного момента: векторное произведение пропорционально площади треугольника образованного векторами потокосцепления статора, ротора и результирующего вектора (для обобщенной электрической машины).

Затраты на активные материалы электропривода могут быть представлены электроприводы могут быть представлены суммой:

$$Q_i = a \cdot F_{Bi} + b \cdot F_{Ai} + c \cdot F_i,$$

где  $a, b, c$  – удельные весовые коэффициенты, а именно,  $a, b$  оценивают удельные затраты на медь и полупроводниковый преобразователь, коэффициент  $c$  – на сталь магнитной системы. Эти коэффициенты для серийных электроприводов давно известны. Однако когда ставится задача выбора параметров двигателя и полупроводникового преобразователя, их номинальных данных для новых типов электроприводов, то эта задача далека от завершения.

Задачу минимизации удельных затрат активных материалов удобно решать введением критерия, который в свое время был предложен профессором Усыниным Ю.С. [1]:

$$q = \sum \frac{Q_i}{M_i}.$$

Но в более общем случае удельные весовые коэффициенты необходимо рассматривать как функции разных параметров электропривода. Ниже будет показано, что оптимизация этих параметров совместно с оптимизацией критерия  $q$  может выполняться в несколько этапов.

В [2] показано на основании регрессионного анализа каталожных данных на полупроводниковые преобразователи и двигатели, что они являются функциями:  $b, c, a$  – отношения внутреннего диаметра к внешнему, числа пар полюсов, коэффициента, учитывающего форму фазного тока (назовем его коэффициентом мощности). Коэффициент  $b_n$ , учитывающий удельные затраты на полупроводниковый преобразователь, является функцией номинального напряжения, тока, числа фаз и коэффициента мощности.

Решать поставленную задачу непосредственно как функцию многих переменных за один этап практически невозможно. Однако если эту задачу разбить на ряд этапов, на каждом из которых вы-

брать соответствующую целевую функцию, то можно добиться весомых результатов.

Покажем, что на первом этапе весовые коэффициенты двигателя могут не оптимизироваться и выбираться так же, как и для традиционных двигателей, а коэффициент  $b_n$  может рассчитываться из условия минимума.

В идеальном [2] электроприводе с СРМНВ удается достигнуть улучшения удельных показателей на 15–30 % в зависимости от установленной мощности (меньшие значения соответствуют меньшей мощности). Анализ распределения весовых коэффициентов в идеальном электроприводе с СРМНВ показывает, что коэффициенты  $a, b, c$  снижаются на 5, 7, 5 % соответственно относительно исходных (серийных) значений. Подстановка и решение задачи оптимизации параметра  $q$  для исходных и предельных значений коэффициентов дает расхождение в перераспределении активных материалов не более чем на 2 %.

С другой стороны, показатель  $b_n$ , значение которого зависит от номинального напряжения, тока, количества фаз и коэффициента формы тока, может быть оптимизирован независимо от основных параметров используя метод частной оптимизации переменной. Количество оптимизируемых переменных превышает количество уравнений связи и ограничений. В этом случае удобно воспользоваться методом объединения. В нашем случае влияние формы фазного тока на значение параметра  $b_n$  можно отбросить и его значение будет уточнено на последующих этапах оптимизации.

В результате оптимизации установлено, что при переходе к шестифазной схеме с индивидуальными источниками питания при мощности  $P > 900$  кВт параметр  $b_n$  принимает наименьшее значение. Этот результат следует объяснить тем, что дробление фаз в электроприводе такой мощности позволяет отказаться от дорогостоящих высоковольтных вариантов. Также было установлено, что в диапазоне мощностей от 300 и выше в электроприводах с СРМНВ удобнее перейти на номинал  $U = 660$  В, так как при прочих равных условиях (полупроводниковые ключи выбираются на тот же класс напряжения, что и при питании от  $U = 380$  В), очевидно, что номинальный ток снижается.

Полученные значения удельных весовых коэффициентов позволяют сформулировать задачу оптимизации первого этапа. Следует найти такое соотношение между массами железа, меди и полупроводникового преобразователя, при которых

$$q = \sum \frac{Q_i}{M_i}$$

принимает наименьшее значение.

Эта задача решалась аналитически с использованием метода неопределенных множителей Лагранжа.

Сначала выполнялся поиск оптимального соотношения для традиционной реактивной машины. Результаты расчета показали, что существующие (рекомендуемые в существующих справочниках) для машины соотношения можно считать оптимальными.

При переходе к векторному управлению электроприводом с СРМНВ положение векторов потокосцепления возбуждения и реакции якоря жестко фиксируется системой управления. Ограничения, накладываемые на форму треугольника, образованного векторами потокосцеплениями возбуждения, реакции якоря и результирующего вектора в случае векторного управления снимаются. В этом случае, перераспределя активные материалы между железом и медью в электрической машине, удается улучшить значение показателя  $q$  на 10 %.

Учет габаритов полупроводникового преобразователя, который актуален, например в электро-транспорте, приводит к увеличению весовых коэффициентов  $a$  и  $b$ . В этом случае перераспределение активных материалов идет в пользу железа, а эффект от оптимизации снижается до  $q=8$  %.

Практический интерес представляет задача поиска оптимальных соотношений между активными материалами, если в качестве весовых коэффициентов выбирать их стоимостные значения. Актуальность такой постановки задачи очевидна: стоимость вентиляного преобразователя превосходит стоимость электрической машины в 2–4 раза.

В этом случае алгоритм расчета сохранялся, а весовые коэффициенты выбирались на основании анализа и статистической обработки данных фирм-поставщиков электротехнического оборудования. Установлено, что перераспределение активных материалов в пользу «железа» позволяет снизить стоимость комплекса «вентильный преобразователь – двигатель», однако значительный эффект, выраженный в абсолютном выражении, достигается, начиная с мощности 200 кВт. Это объясняется тем, что в области больших мощностей возрастает доля стоимости вентиляного преобразователя в общей стоимости комплекса.

На втором этапе выполнялась оптимизация и уточнение весовых коэффициентов по меди и железу с учетом насыщения магнитной системы СРМНВ. Фактически задача сводилась к поиску оптимальных геометрических параметров электрической машины (внешнего диаметра статора, отношения диаметров ротора к внешнему диаметру магнитопровода статора, количеству пар полюсов машины). В качестве критерия оптимизации на этом этапе удобнее выбрать электромагнитный момент. Оптимизация проводилась численными методами на математической модели электропривода [3]. В работе показано, что электромагнитный момент как функция отношения диаметров является непрерывной не возрастающей и неубывающей,

поэтому функция имеет глобальный экстремум. Перебор значений выполнялся методом золотого сечения.

Оптимизация выполнялась численными методами последовательно: сначала принималось значение диаметра, для которого варьировалась полюсная дуга, затем давалось приращение к величине диаметра и процедура повторялась. Эта оптимизационная процедура повторялась для другого числа полюсов.

Оптимизация и вычисление весовых коэффициентов для обычных сетевых двигателей эффекта не дала.

В электроприводах, работающих в замкнутых системах, этот эффект оказывается более значительным. Так в четырехполюсных СРМНВ, работающих в векторных системах управления, электромагнитный момент улучшался на 10–15 %. Этот результат следует объяснить тем, что в традиционных нерегулируемых синхронных электроприводах машина проектировалась с запасом статической устойчивости. В замкнутых электроприводах заботиться о статической устойчивости не приходится, это решается за счет единичной положительной обратной связи по положению в контуре регулирования электромагнитного момента. При ортогональном расположении векторов потокосцепления возбуждения и реакции якоря распределение линий магнитной индукции, а значит и условия насыщения меняются, что и потребовало пересмотра геометрических параметров машины.

В сетевых электроприводах приходилось выбирать количество пар полюсов в зависимости от скорости рабочего механизма. В частотно-регулируемых электроприводах согласование скорости рабочего механизма и двигателя выполняется за счет регулирования частоты источника питания.

С учетом сказанного, поиск оптимального количества полюсов является актуальной задачей. Установлено, что в электроприводах с СРМНВ мощностью до 100 кВт наилучшие значения достигаются при 4 полюсах. По сравнению с двухполюсным вариантом электропривода момент двигателя улучшался на 30 %, а по сравнению с шестиполюсным макетом на 5 %. В электроприводах при мощностях больших 100 кВт лучшие показатели по электромагнитному моменту получаются в шестиполюсных машинах. Полученные результаты были объяснены изменением соотношений спинки статора при увеличении внешнего диаметра.

На третьем этапе оптимизировались и уточнялись значения весовых коэффициентов с учетом формы фазного тока. Для этого выполнялся поиск законов управления фазными токами для разных схем силовых цепей и структур управления электропривода с позиции улучшения удельных показателей. В работе доказано, что в качестве критерия оптимизации на этом этапе удобно выбрать

показатель точности регулирования – минимум амплитуды пульсаций по моменту.

Для случая бесконечного числа фаз задача может быть решена аналитическими вариационными методами. Показано, что в этом случае оптимальная форма тока достигается при прямоугольном графике. Критерий оптимизации в этом случае численно равен нулю.

В общем случае оптимизации при конечном числе фаз на форму фазного тока накладываются ограничения схемой силовых цепей. Наличие пульсаций по моменту требует учета частоты среза контура регулирования скорости. Дело в том, что пульсации скорости, вызванные пульсациями момента, будут усиливаться регулятором скорости. Поэтому в качестве критерия оптимизации предлагается принять отношение частоты среза к коэффициенту пульсаций.

Показано, что рассматриваемая функция является выпуклой непрерывной функцией, поэтому она будет иметь один глобальный экстремум,

граница которого известна и равна нулю в случае бесконечного числа фаз. Оптимизация формы фазных токов выполнялась численными методами с использованием последовательности Фибоначчи.

#### **Литература**

1. Усынин, Ю.С. *Следящие дифференциальные электроприводы автономных объектов: дис... д-ра техн. наук / Ю.С. Усынин.* – М., 1994. – 241 с.

2. Григорьев, М.А. *Линейная плотность поверхностного тока в энергосберегающих электроприводах с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев, А.Е. Бычков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика».* – 2010. – Вып. 14. – № 32(208). – С. 46–51.

3. Усынин, Ю.С. *Частотные характеристики канала регулирования момента в синхронных электроприводах / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков // Электричество.* – 2012. – № 4. – С. 54–59.

*Поступила в редакцию 04.09.2012 г.*

**Усынин Юрий Семенович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Контактный телефон: 8 (351) 267-93-21.

**Usynin Yuriy Semenovich** – Doctor of Science (Engineering), Professor of “Electric Drive and Production Units Automation” Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Contact telephone number: 8 (351) 267-93-21.

**Григорьев Максим Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Контактный телефон: 8-919-123-67-13.

**Grigoryev Maksim Anatolievich** – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of “Electric Drive and Production Units Automation” Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Contact telephone number: 8-919-123-67-13.

**Шишков Александр Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Контактный телефон: 8 (351) 267-93-21.

**Shishkov Aleksandr Nikolaevich** – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of “Electric Drive and Production Units Automation” Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Contact telephone number: 8 (351) 267-93-21.

**Лохов Сергей Прокопьевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Контактный телефон: 8 (351) 267-93-21.

**Lokhov Sergey Prokopievich** – Doctor of Science (Engineering), Professor of “Electric Drive and Production Units Automation” Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Contact telephone number: 8 (351) 267-93-21.

**Журавлев Артем Михайлович** – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Контактный телефон: 8-952-509-00-96.

**Zhuravlev Artem Mikhaylovich** – postgraduate of “Electric Drive and Production Units Automation” Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Contact telephone number: 8-952-509-00-96.