

И.С. ВАРШАМОВА, аспирант;
В.С. ЛУПИКОВ, д-р техн. наук

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"
(Харьков)

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Приведено результати аналізу температурної нестабільності параметрів силового електроустановки, що знижують ефективність відомих систем автоматичної компенсації його зовнішнього магнітного поля. Обґрунтовано можливість використання нечіткої логіки для підвищення ефективності багатопараметричних систем автоматичної компенсації цього поля при забезпеченні вимог електромагнітної сумісності.

Приведены результаты анализа температурной нестабильности параметров силового электрооборудования, снижающей эффективность известных систем автоматической компенсации его внешнего магнитного поля. Обоснована возможность применения нечеткой логики для повышения эффективности многопараметрических систем автоматической компенсации этого поля при обеспечении требований электромагнитной совместимости.

Введение. Перспективным направлением обеспечения требований электромагнитной совместимости технических средств, в том числе и электрооборудования, в части переменного магнитного поля частоты сети [1, 2] является применение систем автоматической компенсации, построенных по принципу разомкнутых систем регулирования [3-6]. Эффективность этих систем, определяемая как отношение модулей напряженности поля до и после компенсации, во многом определяется стабильностью параметров электрооборудования. В лабораторных условиях максимальные величины эффективности зафиксированы на уровне 100-300 единиц. Как показывают исследования, эти максимальные величины ограничены погрешностью измерений напряженности поля. Однако в реальных условиях эти величины существенно ниже и достигают 25-50 единиц. Основная причина такого отличия – нестабильность параметров самого электрооборудования. В частности, нестабильность токов в установившемся режиме работы электрооборудования приводит к изменению величин магнитных моментов источников внутри его объема. По условиям существующей технологии,

настройка параметров системы автоматической компенсации проводится в фиксированный момент времени в предположении, что магнитные моменты источников магнитного поля электрооборудования не меняются. Поэтому с течением времени увеличивается разница между магнитными моментами электрооборудования и настроенными электромагнитами системы компенсации, что и снижает ее эффективность.

В настоящее время анализ магнитных моментов электрооборудования и систем компенсации проводится с использованием математических методов классической теории. Эти методы требуют на каждом шаге моделирования точных и однозначных формулировок закономерностей изменения токов в электрооборудовании и его частичных (выделенных) объемах [7, 8]. При представлении электрооборудования в виде системы соприкасающихся выделенных объемов число моделирующих дипольных источников резко возрастает по мере приближения области компенсации поля к его поверхности. В этом случае системы автоматической компенсации становятся многопараметрическими.

В перспективе предполагается расширение диапазона режимов работы электрооборудования, в которых требуется компенсации внешнего магнитного поля [9, 10], и повышение эффективности компенсации внешнего магнитного поля до 1000 единиц [11]. При существующем подходе для формулировки условий компенсации требуется применение сложного аппарата дифференциального и интегрального исчислений. Это приводит к усложнению алгоритмов и в конечном итоге снижает эффективность систем компенсации.

Цель работы – теоретическое обоснование возможности применения нечеткой логики для повышения эффективности систем автоматической компенсации внешнего магнитного поля электрооборудования.

Анализ температурной нестабильности параметров силового электрооборудования. Наибольшее влияние на нестабильность параметров оказывает неравномерный нагрев токопроводов силовой цепи в объеме электрооборудования. Неравномерный нагрев может быть вызван как меняющимся в процессе работы перераспределением источников нагрева, так и большими величинами постоянных времени процесса нагрева, которые трудно учесть в процессе настройки. Примером первого случая является неравномерный нагрев проводников распределительного устройства с большим числом фидеров, когда по условиям функционирования часть фидеров находится под током, а остальные фидеры обесточены. Поскольку фидеры могут переключаться в процессе работы распределительного устройства, источники магнитного поля – контуры силовой цепи, находящиеся под током, меняют свое положение. Режим нагрева в этом случае не удастся описать математически.

Примером второго случая является крупногабаритное электрооборудование, нагрев которого в одном и том же режиме до установившейся

температуры может занять несколько часов.

При изменении температуры проводников силовой цепи в обоих случаях их удельное сопротивление ρ меняется и описывается известным соотношением [12]

$$\rho = \rho_0 K_s K_c (1 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \alpha_3 T^3 + \dots), \quad (1)$$

где ρ_0 – удельное сопротивление проводника при температуре 0°C ; K_s , K_c – коэффициенты поверхностного эффекта и эффекта близости проводников; α_1 , α_2 , α_3 , – температурные коэффициенты сопротивления; T – температура нагретого проводника, $^\circ\text{C}$.

Особенностью электрооборудования, которую необходимо учитывать при снижении внешнего магнитного поля, является то, что допустимые по условиям эксплуатации отклонения электрических величин не гарантируют того, что уровни магнитного поля не превысят требований. Другими словами, требования по магнитному полю к параметрам электрооборудования должны быть более жесткими. В этой связи даже небольшие отклонения в величинах удельных сопротивлений проводников (1) из-за их неравномерного нагрева приводят к отклонениям токов силовой цепи, а соответствующие им величины магнитных моментов превышают требования стандартов. Это связано с тем, что существующие методы и средства снижения внешнего магнитного поля обычно используются в комбинации [13], при этом отдельные источники поля взаимно компенсируются. Именно неполная компенсация магнитных моментов, обусловленная различным влиянием нагрева на токи силовой цепи электрооборудования, определяет в конечном итоге его магнитный момент после стеновой настройки системы автоматической компенсации.

Краткая характеристика нечеткой логики. В области систем автоматического управления различными техническими устройствами в настоящее время все шире применяются системы, основанные на Fuzzy Logic – нечеткой логике. Прилагательное "fuzzy" можно перевести на русский язык как нечеткий, размытый и введено в название новой теории с целью отделения от традиционной четкой математики и аристотелевой логики, оперирующих с числами и четкими понятиями. В математическом плане Fuzzy Logic позволяет оценить количественно промежуточные значения между стандартными оценками "0" и "1" ("да-нет", "верно-неверно", "холодно-тепло"). В зависимости от того, каким образом устанавливаются промежуточные оценки между стандартными "0" и "1", различают множество методов, включая методы экспертного оценивания и искусственного интеллекта – самообучающиеся. На базе этих методов разрабатываются алгоритмы Fuzzy Logic, которые учитывают как конечную цель управления, так и метод оценивания.

Для обращения с неточно известными величинами обычно применяется математический аппарат теории вероятностей. Однако вероятность связана с

неопределенностью, касающейся принадлежности некоторого объекта к обычному множеству. Это различие между нечеткостью и вероятностью приводит к тому, что математические методы нечетких множеств совершенно не похожи на методы теории вероятностей. Они во многих отношениях проще вследствие того, что понятию вероятностной меры в теории вероятностей соответствует более простое понятие функции принадлежности в теории нечетких множеств. Вследствие этого даже в тех случаях, когда неопределенность в процессе принятия решений может быть представлена вероятностной моделью, обычно удобнее оперировать с ней методами теории нечетких множеств без привлечения аппарата теории вероятностей.

Fuzzy Logic является следующим шагом в теории автоматического управления и открывают большие возможности эффективного решения сложных задач управления в системах с нелинейными параметрами по сравнению с известными методами. Системы, основанные на Fuzzy Logic, разработаны и успешно внедрены во многих областях (управление технологическими процессами, управление транспортом, медицинская диагностика, техническая диагностика и др.). В системах автоматической компенсации внешнего магнитного поля технических объектов методы Fuzzy Logic до настоящего времени не использовались. Однако применение таких систем намечается [14].

Основное достоинство Fuzzy Logic связаны с упрощением управления нелинейными системами. Первое упрощение обусловлено тем, что с помощью естественно-языковых высказываний-правил "если-то" и последующей их формализацией средствами теории нечетких множеств можно сколько угодно точно отразить произвольную взаимосвязь "входы-выходы" без использования сложного аппарата дифференциального и интегрального исчисления, традиционно применяемого в управлении. Второе упрощение связано с тем, что нечеткие числа, получаемые в результате "не вполне точных измерений", во многом аналогичны распределениям теории вероятностей, но свободны от их недостатков: малое количество пригодных к анализу функций распределения, необходимость их принудительной нормализации, соблюдение требований аддитивности, трудность обоснования адекватности математической абстракции для описания поведения фактических величин. В пределе, при возрастании точности, нечеткая логика приходит к стандартной, Булевой. По сравнению с вероятностным методом, нечеткий метод позволяет резко сократить объем производимых вычислений, что, в свою очередь, приводит к увеличению быстродействия нечетких систем.

Недостатками нечетких систем являются отсутствие стандартной методики конструирования нечетких систем и невозможность математического анализа нечетких систем существующими методами.

Возможность применения Fuzzy Logic в системах автоматической компенсации. Основная идея использования достоинств Fuzzy Log-

ис в системах автоматической компенсации внешнего магнитного поля – формирование корректирующих сигналов в процессе работы электрооборудования, учитывающих небольшие нелинейные отклонения параметров (токов и напряжений) от номинальных. При этом формирование корректирующих сигналов проводится на основе метода Fuzzy Logic.

По результатам проведенных исследований может быть предложена следующая структура системы автоматической компенсации внешнего магнитного поля электрооборудования, схема которой показана на рис. 1.

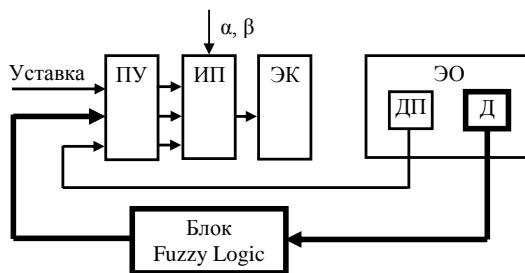


Рис. 1

На схеме использованы следующие обозначения: ПУ – программное устройство; Уставка – канал регулирования параметров программного устройства по экспериментальным данным в процессе стендовой настройки системы автоматической компенсации; ИП – регулируемый источник питания; α, β – коэффициенты передачи усилителей тока ИП для формирования сигналов при настройке магнитных моментов электрооборудования и его выделенных объемов; ЭК – электромагнит компенсатор; ЭО – электрооборудование; ДП – датчики электрических параметров (токов и напряжений контуров силовой цепи); Д – датчики неэлектрических параметров; Блок Fuzzy Logic – блок формирования корректирующих сигналов с использованием методов Fuzzy Logic.

Новые элементы и связи выделены утолщенными линиями.

Формирование компенсирующих сигналов проводится в программном устройстве на основе сигналов токов и напряжений, снимаемых с датчиков параметров, как и в известной системе компенсации. Регулирование этих сигналов проводится при стендовой настройке системы автоматической компенсации в составе работающего электрооборудования. Структура компенсирующего сигнала в этом случае имеет вид:

$$i_v(t) = \sum_{q=1}^Q \left[\sum_{k=1}^K (\alpha_{vk} \cdot i_k(t) + \beta_{vk} \cdot u_k(t)) \right], \quad (2)$$

где $i_v(t)$ – ток, формируемый программным устройством по каналу v ($v = x, y, z$); q – номер выделенного объема электрооборудования, $q = (\overline{1, Q})$; Q – число выделенных объемов; k – номер независимого контура силовой цепи, $k = (\overline{1, K})$; K – число контуров; α_{vk}, β_{vk} – коэффициенты, фиксируемые величины которых устанавливаются по результатам стендовой настройки системы автоматической компенсации; $i_k(t)$ – ток k -го независимого контура; $u_k(t)$ – напряжение в k -м независимом контуре.

На основе этих сигналов формируются токи электромагнитов компенсаторов. При протекании этих токов по электромагнитам компенсаторам, расположенных в каждом из выделенных объемов электрооборудования, создается компенсирующий магнитный момент, отвечающий условиям компенсации [5]:

$$m_{vq}(t) + m'_{vq}(t) + \varepsilon_m = 0 \quad q = (\overline{1, Q}), \quad (3)$$

где $m_{vq}(t)$ – компонента магнитного момента вдоль пространства направления v , создаваемая источниками поля q -го выделенного объема; $m'_{vq}(t)$ – компонента компенсирующего магнитного момента вдоль пространства направления v , создаваемая соответствующим электромагнитом компенсатором расположенном в q -м выделенном объеме; ε_m – погрешность компенсации магнитного момента.

Датчиками неэлектрических параметров (например, датчиками температуры) формируются аналоговые сигналы, поступающие на вход Блока Fuzzy Logic. Этот блок выполняет три операции: фаззификации, преобразования нечетких данных в управляющие воздействия и дефаззификации, преобразования нечетких данных в четкие сигналы коррекции. Смысл этих операций следующий [15]. Фаззификация – преобразование четких величин, измеренных датчиками D , в нечеткие величины, описываемые лингвистическими переменными в базе знаний. Преобразование нечетких данных в управляющие воздействия использует нечеткие условные правила (if-then), заложенные в базе знаний. Дефаззификация – преобразование нечетких данных в четкую величину. С выхода Блока Fuzzy Logic корректирующие сигналы (четкие величины) поступают на вход программного устройства.

С учетом дополнительной связи на входе программного устройства ток, формируемый программным устройством по каналу v , может быть записан по аналогии с соотношением (2) в виде:

$$i_v(t) = \sum_{q=1}^Q \left[\sum_{k=1}^K (A_{vk}(p) \cdot i_k(t) + B_{vk}(p) \cdot u_k(t)) \right], \quad (4)$$

где $A_{vk}(p)$, $B_{vk}(p)$ – коэффициенты, величины которых формируются по результатам стендовой настройки системы автоматической компенсации и сигналов Блока Fuzzy Logic; p – неэлектрические параметры электрооборудования.

В рассматриваемом случае параметры p соответствуют температурам T выделенных объемов. С учетом соотношения (4) обеспечиваются условия компенсации (3) внешнего магнитного поля электрооборудования не только при стендовой настройке, но и в процессе работы электрооборудования при изменении величин его неэлектрических параметров.

Для обеспечения высокоточного регулирования корректирующих сигналов могут быть использованы алгоритмы, использующие накопленные экспериментальные данные, либо сформированные экспертом – специалистом по компенсации внешнего магнитного поля электрооборудования. Точность регулировки при этом будет определяться точностью модели электрооборудования либо квалификацией эксперта. В частности, при увеличении числа учитываемых температурных коэффициентов сопротивления усложняется модель магнитного поля, учитывающая зависимость токов и напряжений контуров электрооборудования от температуры и увеличивается точность описания этого поля. При этом может быть повышена точность модели поля электрооборудования. Предлагаемая структура системы автоматической компенсации позволяет уточнять коэффициенты $A_{vk}(p)$, $B_{vk}(p)$, регулируя их величины в соответствии с алгоритмами, основанными на Fuzzy Logic в процессе нагрева электрооборудования с учетом возможных режимов его работы. Разработка таких алгоритмов является предметом дальнейших исследований.

Выводы.

1. Проведен анализ температурной нестабильности параметров силового электрооборудования, снижающей эффективность известной параметрической системы автоматической компенсации его внешнего магнитного поля. Показано, что допустимые по условиям эксплуатации отклонения электрических величин электрооборудования не гарантируют обеспечения требований электромагнитной совместимости по уровню внешнего магнитного поля. Для обеспечения этих требований необходимо повысить эффективность систем компенсации.

2. Обоснована возможность применения нечеткой логики для повышения эффективности многопараметрических систем автоматической компенсации. Нечеткая логика может быть использована для коррекции отклонений формируемых сигналов компенсации от величин, установленных при стендовой настройке системы компенсации.

3. Предложена структура параметрической системы автоматической компенсации внешнего магнитного поля электрооборудования, обеспечива-

ющая коррекцию сигналов компенсации с учетом изменения величин неэлектрических параметров. По сравнению с известной в структуру системы компенсации введены датчики неэлектрических параметров и блок, обеспечивающий формирование сигналов коррекции на основе нечеткой логики.

Список литературы: 1. ДСТУ 2465-94. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до магнітних полів частоти мережі. Технічні вимоги та методи випробувань. Введ. 01.01.95. – Київ: Держстандарт України, 1994. – 29 с. 2. *Крыжов Г.П., Кравченко О.А.* Как защититься от вредного воздействия электромагнитного поля (допустимые нормы напряженности поля, ограничения на время пребывания в поле без защитных средств) // Электропанорама. – 2002. – № 11. – С. 40-42. 3. *Розов В.Ю.* Селективная компенсация пространственных гармоник магнитного поля энергонасыщенных объектов // Технічна електродинаміка. – 2002. – № 1. – С. 8-13. 4. Системи автоматичної компенсації зовнішнього магнітного поля енергонасичених об'єктів: Автореф. дис...д-ра техн. наук: 05.09.03 / Національна академія наук України. Ін-т електродинаміки. – Київ, 2002. – 38 с. 5. *Лутиков В.С.* Наукові основи технології компенсації магнітного поля поблизу низьковольтних комплектних пристроїв. – Автореф. дис...д-ра техн. наук: 05.09.01 / Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". – Харків, 2003. – 36 с. 6. *Розов В.Ю.* Анализ эффективности параметрических систем автоматической компенсации внешнего магнитного поля энергонасыщенных объектов // Технічна електродинаміка. – 2002. – №2. – С. 3-10. 7. *Лутиков В.С.* Структурный анализ магнитного момента тока электрических цепей // Технічна електродинаміка. – 1999. – № 4. – С. 9-16. 8. *Лутиков В.С.* Теоретическое обоснование объединенной дипольной модели внешнего магнитного поля электрооборудования // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Зб. наук. праць. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2001. – №17. – С. 95-102. 9. ДСТУ 2625-94. Сумісність технічних засобів електромагнітна: Стійкість до загасаючого магнітного поля. Технічні вимоги і методи випробувань. Введ. 01.07.95. – Київ: Держстандарт України, 1994. – 28 с. 10. ДСТУ 2626-94. Сумісність технічних засобів електромагнітна: Стійкість до імпульсного магнітного поля. Технічні вимоги і методи випробувань. Введ. 01.07.95. – Київ: Держстандарт України, 1995. – 26 с. 11. *Розов В.Ю.* Внешние магнитные поля силового электрооборудования и методы их уменьшения: Препр. / НАН Украины. Ин-т электродинамики; № 772. – Киев: 1995. – 42 с. 12. *Таев И.С.* Электрические аппараты. Общая теория. – М.: Энергия, 1977. – 272 с. 13. *Лутиков В.С.* Оптимальное использование методов, применяемых для снижения внешнего магнитного поля электрооборудования // Вісник Східноукраїнського державного університету. – Луганськ: Вид-во СУДУ. – 1999. – №6 (22). – С. 113-123. 14. *Кирик В.В.* Побудова нелінійних систем керування складними електротехнічними об'єктами на основі нечіткої логіки. // Электропанорама. – 2007. – № 12. – С. 24-28. 15. *Леоненков А.В.* Нечеткое моделирование в среде MatLAB и FuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.

Поступила в редколлегию 13.09.08