

**Кузнецов Б.І.**, доктор технічних наук,  
Інститут технічних проблем магнетизму НАН України  
**Бовдуй І.В.**, кандидат технічних наук,  
Інститут технічних проблем магнетизму НАН України  
**Нікітіна Т.Б.**, доктор технічних наук,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет  
**Коломієць В.В.**, кандидат технічних наук,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет  
**Кобилянський Б.Б.**, кандидат технічних наук,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,

## СИНТЕЗ РОБАСТНОЇ КВАЗІІНВАРІАНТНОЇ СИСТЕМИ АКТИВНОГО ЕКРАНУВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

**Анотація.** Синтез робастної квазіінваріантної системи активного екранування техногенного магнітного поля, яке створюється повітряними лініями електропередачі, заснований на вирішенні багатокритеріальної стохастичної гри, в якій векторний виграв обчислюється на підставі рішень рівнянь Максвелла в квазістационарному наближенні. Рівноважний стан гри знаходиться на основі Парето-оптимального результату з урахуванням відношень переваги за допомогою алгоритмів стохастичної мультиагентної оптимізації мультироєм часток. Наведено приклад синтезу робастної квазіінваріантної системи активного екранування магнітного поля, яке створюється групою повітряними лініями електропередачі.

**Ключові слова:** повітряні лінії електропередачі, техногенне магнітне поле, робастна система активного екранування, багатокритеріальна стохастична гра.

**Вступ.** Методи активного контурного екранування техногенного магнітного поля (МП), яке створюється повітряними ЛЕП [1], є найбільш прийнятними та економічно доцільними для забезпечення санітарних норм України за рівнем магнітного поля промислової частоти. Метод синтезу систем активного екранування (САЕ) МП, створюваного повітряними ЛЕП, розроблений в [2]. Однак в цьому методі не враховується невизначеність параметрів системи, що обумовлена неточно відомою моделлю об'єкта керування, а також змінами параметрів системи в ході її експлуатації [3].

**Метою роботи** є синтез робастної квазіінваріантної системи активного екранування магнітного поля повітряних ЛЕП, які дозволяють зменшити чутливість системи до варіацій параметрів об'єкта керування.

**Постановка задачі.** При синтезі САЕ математична модель вихідного МП відома неточно [3]. Зокрема, приблизно відомі струми в струмопроводах, що мають добові, тижневі, сезонні зміни. Неточно реалізуються геометричні розміри компенсуючих обмоток, параметри регуляторів і т.п. Тому вводиться вектор відхилень параметрів системи від їх номінальних значень, що використовується при синтезі системи. Задача синтезу робастної квазіінваріантної САЕ зводиться до визначення такого вектора просторового розташування і геометричних розмірів компенсаційних обмоток, а також вектору параметрів регулятора розімкнутого та замкнутого контурів керування із допустимої області і вектора варійованих параметрів із заданої області, при яких максимальне значення індукції магнітного поля в обраних точках розглянутого простору приймає мінімальне значення по вектору параметрів регулятора, але максимальне значення по вектору варійованих параметрів

Такий прийом відповідає стандартному підходу до синтезу робастних систем для найгіршого (worst-case) випадку [3], коли варіації параметрів призводять до найбільшого погіршення компенсації вихідного магнітного поля, створюваного повітряними лініями електропередачі. Задача може бути сформульована у вигляді такої багатокритеріальної гри [3] з векторним вигравом, компонентами якого є модулі вектора індукції в точках розглянутого простору. При цьому, природно, необхідно враховувати обмеження на вектор керування і змінні стану системи, вектора шуканих і варійованих параметрів у вигляді векторної нерівності.

В багатокритеріальній грі першим гравцем є вектор параметрів регулятора, його стратегією є мінімізація векторного виграшу, а другим гравцем є вектор варійованих параметрів, який характеризує невизначеність параметрів моделі об'єкта керування, і стратегією цього гравця є максимізація цього ж векторного виграшу. Зауважимо, що компоненти векторного виграшу є нелінійними функціями векторів шуканих параметрів і обчислюються на підставі рішень рівнянь Максвелла в квазістаціонарному наближенні [3].

**Метод рішення.** Для знаходження рівноважного стану багатокритеріальної гри з Парето-оптимальних рішень з врахуванням відносин переваг побудовано алгоритм стохастичної мультиагентної оптимізації на основі безлічі роїв часток [2], кількість яких дорівнює кількості компонент векторного виграшу.

Зауважимо, що в зв'язку з тим, що вектор рішень гри представлений у вигляді стратегій двох гравців – вектора параметрів регуляторів і вектора варійованих параметрів, причому необхідно виконати мінімізацію векторного виграшу по вектору параметрів регуляторів і максимізацію цього ж векторного виграшу по вектору варійованих параметрів. Зазначимо, що багатокритеріальна гра з урахуванням алгоритму її рішення є багатокритеріальною стохастичною динамічною грою, так як в ній явно присутній час і випадковий пошук.

**Результати моделювання на ЕОМ.** Як приклад, розглянуто синтез робастної САЕ магнітного поля, що створюється групою ЛЕП. Така ситуація характерна для околиці міст, куди підходять декілька ЛЕП, а також поблизу підстанцій ЛЕП. Для синтезу САЕ, крім геометричних розмірів ЛЕП і зони екранування, необхідно визначити значення струмів в струмопроводах ЛЕП. Причому, основною невизначеністю при синтезі цієї системи є зміна значення струмів різних ЛЕП, що призводить не тільки до зміни рівня індукції магнітного поля, але і до зміни положення просторово-часової характеристики магнітного поля в зоні екранування. На підставі отриманих експериментальних даних вирішена задача ідентифікації струмів в струмопроводах ЛЕП, при яких мінімізується сума квадратів помилок значень індукції магнітного поля в заданих точках, що вимірюються і моделюються. За отриманою моделлю МП, що створюється декількома ЛЕП, вирішена задача синтезу робастної САЕ, яка має одну компенсаційну обмотку.

Таким чином, синтезована робастна квазіінваріантна САЕ дозволяє зменшити чутливість системи до зміни параметрів об'єкта керування в порівнянні з вихідною САЕ. Розрахункова ефективність екранування синтезованої робастної квазіінваріантної САЕ (більше чотирьох одиниць) підтверджена експериментально на її повномасштабному макеті.

**Висновки.** Синтезована робастна квазіінваріантна система активного екранування магнітного поля, яке створюється повітряними ЛЕП, дозволяє зменшити чутливість системи до невизначеності параметрів моделі об'єкта керування. Синтез робастної квазіінваріантної системи зводиться до багатокритеріальної стохастичної гри, рівноважний стан якої знаходиться на основі мультироєвої стохастичної мультиагентної оптимізації. Наведено приклад синтезу робастної квазіінваріантної системи активного екранування магнітного поля, що створюється групою ЛЕП. Система має одну компенсаційну обмотку і дозволяє знизити рівень індукції вихідного магнітного поля за всім об'ємом розглянутого простору житлового будинку до рівня санітарних норм України, і має меншу чутливість до варіацій параметрів об'єкта керування в порівнянні з відомими системи активного екранування магнітного поля.

#### Література

1. Active Magnetic Shielding (Field Cancellation).2010.: <http://www.emfservices.com/afcs.html>.
2. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Voloshko A.V., Bovdyj I.V., Vinichenko E.V., Kobilyanskiy B.B. Synthesis of an active shielding system of the magnetic field of power lines based on multiobjective optimization. Electrical Engineering & Electromechanics, 2016, vol. 6, pp. 26-30.
3. Кунцевич В.М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации. – К.: Наукова думка, 2006. – 264 с.