

И.С. ВАРШАМОВА, м.н.с., НТУ "ХПИ", Харьков

**СПОСОБ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ
ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С
НЕСИНУСОИДАЛЬНЫМИ ТОКАМИ**

Приведено опис способу автоматичної компенсації змінного магнітного поля, що створюється електроустаткуванням з несинусоїдальними струмами силового кола. Спосіб передбачає незалежне формування двох сигналів у вигляді лінійних комбінацій окремо для синусних і косинусних складових струмів силового кола, що спрощує регулювання гармонійних складових поля при налагодженні.

Приведено описание способа автоматической компенсации переменного магнитного поля, создаваемого электрооборудованием с несинусоидальными токами силовой цепи. Способ предусматривает независимое формирование двух сигналов в виде линейных комбинаций отдельно для синусных и косинусных составляющих токов силовой цепи, что упрощает регулировку гармонических составляющих поля при настройке.

Введение. Проблемы электромагнитной совместимости технических средств [1-4] и экологической безопасности являются актуальными [5] и одним из путей их решения является снижение внешнего магнитного поля (ВМП) с помощью параметрических систем автоматической компенсации (САК) [6, 7]. Анализ источников переменного магнитного поля технических средств показывает, что в большинстве случаев это поле создается на частоте сети и изменяется во времени по несинусоидальному закону. Отличие от синусоидальности объясняется наличием нелинейных зависимостей токов и напряжений технических средств. В частности, в распределительных устройствах (РУ) это отличие от синусоидальности можно объяснить наличием полупроводниковых приборов (тиристоров) в силовой цепи [8, 9], либо наличием трансформаторов и реакторов в цепи нагрузки, нелинейные свойства ферромагнитных материалов которых определяют нелинейный характер РУ как источников ВМП [10]. Основываясь на гармоническом анализе токов и напряжений силовой цепи, в настоящее время разработаны способы, которые предполагают настройку САК для каждой гармонической составляющей на магнитоизмерительном стенде. В боль-

шинстве случаев настройка предполагает регулировку составляющих гармонических сигналов по амплитуде и фазе. Поскольку таких гармонических составляющих может быть много (3, 6, а теоретически это число стремится к бесконечности), возникают сложности инструментальной реализации таких способов. Это связано с необходимостью использования при настройке нескольких различных приборов (анализаторов гармоник в различном диапазоне и измерителей фаз на различных частотах).

Цель работы – на основе анализа известных способов автоматической компенсации разработать упрощенный более точный способ компенсации ВМП.

Анализ известных способов. Известен способ компенсации ВМП РУ с помощью параметрической САК [10]. Последняя содержит первичные преобразователи независимых параметров РУ, которые определяют его магнитное поле, программное устройство для формирования и регулирования силы токов компенсации, источник питания с тремя каналами регулирования для усиления по мощности и регулирования токов компенсации соответственно каждой из трех пространственных компонент магнитного поля, систему электромагнитов компенсаторов (ЭК) (компенсационных обмоток), токи которых и создают магнитное поле, которое имеет компоненты в трех ортогональных пространственных направлениях и компенсирует поле создаваемое токами РУ. Способ включает измерение независимых параметров РУ, формирования сигналов токов ЭК по каждому из пространственных направлений по определенным алгоритмам в зависимости от величин независимых параметров, измерения составляющих компонент напряженности ВМП при одновременно включенных РУ и соответственных этим компонентам ЭК, регулирования сигналов токов в зависимости от измеренных составляющих компонент напряженности ВМП в процессе стендовой настройки САК, усиления сигналов токов компенсации по каждому из пространственных направлений по мощности и питания сформированными токами ЭК САК при работе РУ. Как независимые параметры используются токи независимых контуров силовой цепи, напряжения на элементах этих контуров, намагниченность элементов ферромагнитных систем РУ. Недостатком известного способа есть большое количество независимых параметров и сложные алгоритмы формирования токов компенсации в зависимости от этих параметров.

Известен также способ, реализованный в виде САК переменного ВМП (момента), создаваемого токами при работе трехфазного РУ, ко-

торое содержит множество трехфазных фидеров [8]. Способ реализован в виде параметрической САК магнитного момента (ММ), который характеризует с заданной точностью трехфазное РУ как источник ВМП на расстояниях более 3-5 габаритов. В состав САК входят: первичные преобразователи токов, включенные в разрывы проводников двух из трех фаз для всех фидеров, однотипные устройства обработки их сигналов, которые содержат фазосдвигающие устройства и регулируемые усилители тока, число которых равно удвоенному числу фидеров трехфазного РУ, последовательно включенные сумматор, регулируемый усилитель мощности и ЭК (или обмотка компенсации) для каждой из трех пространственных компонент вектора ММ, который нужно компенсировать. Известный способ включает измерение токов двух фаз каждого из трехфазных фидеров, формирование из них токов ЭК по каждой из пространственных направлений в виде линейных зависимостей от величин токов фидеров трехфазного РУ, предварительное измерение при стеновой настройке САК составляющих компонент ММ при одновременно включенных трехфазном РУ и ЭК, оси которых соответствуют этим компонентам, регулирование по фазе, величины и усиление мощности сигналов токов компенсации по каждой из пространственных направлений, и питание сформированными токами ЭК при работе трехфазного РУ. В сравнении с предыдущим, этот способ имеет меньшее количество независимых параметров, ограниченное только токами контуров силовой цепи трехфазного РУ и более простой алгоритм формирования токов ЭК за счет использования линейной функции этих токов от токов независимых контуров силовой цепи. Способ имеет существенный недостаток: его использование возможно только в случаях, если токи РУ являются синусоидальными. Поэтому его использование возможно только тогда, когда известна априорная информация именно для такого случая.

Анализ этих методов показывает, что для компенсации каждой гармонической составляющей поля требуется регулировка амплитуды и фазы каждого сигнала компенсации, что является недостатком известных методов.

Предлагаемый способ компенсации ВМП. Для преодоления недостатков известных способов предлагается проводить компенсацию ВМП для каждой гармонической составляющей токов, используя ее косинусную и синусную составляющую. При этом операция регулировки по фазе каждой гармонической составляющей сводится к регулировке по амплитуде синусной и косинусной составляющей. При этом для реализации способа при настройке САК не требуется измере-

ние фаз составляющих с помощью фазометра. За счет этого обеспечивается упрощение способа компенсации. Кроме того, существующие приборы измерения фаз (фазометры), в большинстве случаев имеют существенно большую погрешность (на порядок и более), чем измерители амплитуды.

Структура параметрической САК, реализующей предложенный способ компенсации ВМП, представлена на рис. 1. Обозначения на схеме: 1 – первичный преобразователь тока (датчик тока ДТ), коэффициент передачи которого $1/p$ и количество которых определяет количество K независимых контуров силовой цепи; 2 – программное устройство ПУ; 3 – блок фильтров БФ для фиксированного числа N частотных составляющих токов; 4 – устройство ортогонального разложения УОР входного сигнала на синусные и косинусные составляющие для каждой гармоники; 5 – усилитель тока УТ, коэффициент усиления которого можно регулировать; 6 – сумматор S сигналов (токов); 7 – эталон фазы ЭФ; 8 – усилитель мощности УМ с коэффициентом усиления p и заданным набором параметров (амплитуд N гармоник токов); 9 – электромагнит-компенсатор ЭК; x, y, z – каналы регулирования соответствующие конструктивным осям РУ.

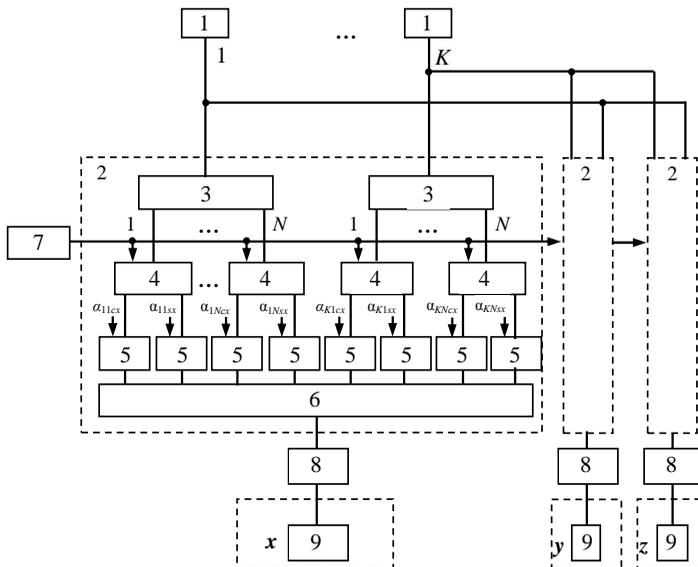


Рис. 1. Блок-схема параметрической САК.

Однотипные первичные преобразователи тока 1 трехфазного РУ включены по одному в цепь каждого из K -независимых контуров его силовой цепи. Каждое из программных устройств 2, число которых соответствует числу каналов регулирования и равен трем, содержит: блок фильтров 3 с N выходами; N устройств ортогонального разложения входного электрического сигнала 4; $2N$ усилителей тока 5 с регулирурованными коэффициентами усиления и сумматор 6. Выходы преобразователей 1 соединены с входами блоков 3. Каждый из N блоков фильтров совмещен с первым входом устройства 4, а его второй вход соединен с входом эталона сдвига фаз 7. Однотипные устройства ортогонального разложения имеют по два выхода – "косинусный" и "синусный". Сигнал каждого из этих выходов через усилитель 5 поступает на вход сумматора. Выход последнего, через усилитель мощности 8, соединен с входными зажимами катушки ЭК 9 соответствующего канала регулирования.

Способ реализуется следующим образом. Первичные преобразователи 1 электрического тока производят измерение токов независимых контуров силовой цепи трехфазного РУ. Например, измеряют токи двух его фаз каждого из трехфазных фидеров. На своем выходе каждый первичный преобразователь тока формирует электрический сигнал (ток), который пропорционален току независимого контура. Далее сигнал с выхода первичного преобразователя поступает в программное устройство 2, где в блоке фильтров 3 происходит его разделение (преобразование) на фиксированное число N гармонических составляющих, частота которых кратна частоте ω сети питания трехфазного РУ. Для определенности положим, что число гармонических составляющих ограничивается шестью, $N \leq 6$. Устройство ортогонального разложения 4 обеспечивает разложение каждого из входных сигналов фиксированной частоты $n\omega$ на косинусную и синусную составляющие. С помощью эталона сдвига фазы 7 происходит отсчет сдвига фаз всех гармонических составляющих тока. В усилителях тока 5 происходит регулирование амплитуд I_{mknc} , I_{mksn} сформированных косинусных и синусных составляющих токов путем определения их величин в соответствии с соотношением:

$$\alpha_{kncu} = \frac{I_{mknc} \cdot S_{ku}}{I_u \cdot w_u \cdot S_u}; \alpha_{knsu} = \frac{I_{mksn} \cdot S_{ku}}{I_u \cdot w_u \cdot S_u}, \quad (1)$$

где I_{mknc} , I_{mksn} – амплитуды составляющих n -й гармоники тока k -го независимого контура силовой цепи, которые изменяются во времени по законам косинуса и синуса; S_{ku} – проекция вектора площади k -го контура

силовой цепи РУ в направлении u ($u = x, y, z$ – конструктивные оси РУ); I_u – номинальный ток усилителя мощности канала u ; w_u – число витков катушки ЭК канала u ; S_u – площадь витка катушки ЭК канала u .

После их суммирования в сумматоре 6 на его выходе формируется электрический сигнал (ток) в виде линейной зависимости от косинусных и синусных составляющих N гармоник токов независимых контуров силовой цепи трехфазного РУ. Сформированный ток усиливается по мощности в 8 и подается в соответствующий ЭК 9. По условию (1) магнитные моменты ЭК обеспечивают полную компенсацию ММ РУ.

Действительно, мгновенный переменный периодический ток $i_k(t)$ k -го независимого контура силовой цепи РУ можно представить суммой гармоник основной угловой частоты ω сети питания:

$$i_k(t) = \sum_{n=1}^N I_{mkn} \cdot \sin(n\omega t + \varphi_{kn}), \quad (2)$$

где I_{mkn} – амплитуда составляющей n -й гармоники тока k -го независимого контура силовой цепи РУ; φ_{kn} – сдвиг фазы n -й гармоники этого тока относительно начала периода повторения электромагнитных процессов в РУ.

Измеренный ток k -го контура силовой цепи уменьшается первичным преобразователем в p раз и на его выходе присутствует сигнал вида:

$$i'_k(t) = \sum_{n=1}^N I_{mkn} \cdot \frac{1}{p} \cdot \sin(n\omega t + \varphi_{kn}). \quad (3)$$

Блок фильтров выделяет из этого сигнала N гармоник:

$$i'_{kn}(t) = I_{mkn} \cdot \frac{1}{p} \cdot \sin(n\omega t + \varphi_{kn}); \quad (4)$$

$$n = 1, \dots, N.$$

Каждый из этих сигналов поступает в устройство ортогонального разложения, на выходах которого формируются два сигнала, которые изменяются во времени по законам косинуса и синуса:

$$i'_{knc}(t) = \left(I_{mkn} \cdot \frac{1}{p} \cdot \sin \varphi_{kn} \right) \cdot \cos n\omega t = I'_{mkn} \cdot \cos n\omega t; \quad (5)$$

$$i'_{kns}(t) = \left(I_{mkn} \cdot \frac{1}{p} \cdot \cos \varphi_{kn} \right) \cdot \sin n\omega t = I'_{mkn} \cdot \sin n\omega t.$$

Сдвиги фаз φ_{kn} , которые входят в формулы (3)-(5), отсчитывают от начальной фазы, которая задается эталоном сдвига фаз.

Амплитуды этих косинусных и синусных гармонических составляющих (5) регулируются в усилителях соответственно в α_{kncu} и α_{knsu} раз:

$$\begin{aligned} I'_{mkncu} &= I'_{mknc} \cdot \alpha_{kncu}; \\ I'_{mknsu} &= I'_{mkns} \cdot \alpha_{knsu}. \end{aligned} \quad (6)$$

В сумматоре б каждого канала u гармонические сигналы с амплитудами (6) суммируются:

$$i'_u(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (I'_{mkncu} \cdot \cos n\omega t + I'_{mknsu} \cdot \sin n\omega t). \quad (7)$$

$$u = x, y, z.$$

Подученные сигналы тока усиливаются в p раз в усилителе мощности 8. Тем самым заканчивается процесс формирования тока питания ЭК соответствующего канала u :

$$\begin{aligned} i_u(t) &= i'_u(t) \cdot p = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (I'_{mkncu} \cdot p \cdot \cos n\omega t + I'_{mknsu} \cdot p \cdot \sin n\omega t) = \\ &= \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (I_{mkncu} \cdot \cos n\omega t + I_{mknsu} \cdot \sin n\omega t). \end{aligned} \quad (8)$$

Токами $i_k(t)$ ($k = 1, \dots, K$) РУ создается переменный во времени ММ, компонента которого $m_u(t)$ в пространственном направлении u равна:

$$m_u(t) = \sum_{k=1}^K i_k(t) \cdot S_{ku} = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (I_{mknc} \cdot S_{ku} \cdot \cos n\omega t + I_{mkns} \cdot S_{ku} \cdot \sin n\omega t). \quad (9)$$

Ток питания катушки ЭК $i_u(t)$ создает ММ $m'_u(t)$ в пространственном направлении u :

$$m'_u(t) = -i_u(t) w_u S_u. \quad (10)$$

Компонента ММ $m'_u(t)$, которая обусловлена током ЭК канала u , после последовательной подстановки выражений токов с учетом (4)-(8) в (10) принимает вид:

$$\begin{aligned} m'_u(t) &= -i_u(t) w_u S_u = \\ &= -\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (p I'_{mkncu} \cdot \cos n\omega t + p I'_{mknsu} \cdot \sin n\omega t) w_u S_u = \\ &= -\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (p I'_{mknc} \alpha_{kncu} \cos n\omega t + p I'_{mkns} \alpha_{knsu} \sin n\omega t) w_u S_u = \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
&= -\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \left[p \left(I_{mkn} \frac{1}{p} \sin \varphi_{kn} \right) \alpha_{kncu} \cdot \cos n\omega t + \right. \\
&\quad \left. + p \left(I_{mkn} \frac{1}{p} \cos \varphi_{kn} \right) \alpha_{kncu} \sin n\omega t \right] w_u S_u = \\
&= -\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \left(I_{mkn} \frac{I_{mknc} \cdot S_{ku}}{I_u \cdot w_u \cdot S_u} \cos n\omega t + I_{mkn} \frac{I_{mkns} S_{ku}}{I_u w_u S_u} \sin n\omega t \right) w_u S_u = \\
&= -\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \left(\frac{I_{mkn}}{I_u} I_{mknc} S_{ku} \cos n\omega t + \frac{I_{mkn}}{I_u} I_{mkns} S_{ku} \sin n\omega t \right).
\end{aligned}$$

Учитывая, что в заданном диапазоне частот усиление амплитуд одинаковое для всех гармоник токов можно записать:

$$I_{mkn} = I_u \quad (u = x, y, z), \quad (12)$$

где I_u – номинальный ток усилителя мощности канала u .

С учетом (12) компонента ММ (11) ЭК равна:

$$m'_u(t) = -\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (I_{mknc} \cdot S_{ku} \cdot \cos n\omega t + I_{mkns} \cdot S_{ku} \cdot \sin n\omega t). \quad (13)$$

Как видно из соотношений (9) и (13), одноименные компоненты ММ токов РУ и ЭК отличаются только знаком и суммарный ММ токов РУ и ЭК равен нулю. Тем самым обеспечивается выполнение условия полной компенсации ВМП РУ.

При изменении токов контуров силовой цепи РУ, в том числе отключение токов отдельных контуров или изменение их формы, обеспечивается автоматическая компенсация ММ РУ.

Выводы.

1. Предложен способ автоматической компенсации переменного ММ РУ с несинусоидальными токами силовой цепи. Отличительной особенностью способа является то, что он предусматривает независимое формирование двух сигналов в виде линейных комбинаций отдельно для синусных и косинусных составляющих токов силовой цепи. Предложенный способ позволяет упростить регулировку составляющих компенсирующих сигналов электромагнитов компенсаторов системы автоматической компенсации, так как не требуется использование измерителей фаз для различных гармоник.

2. Показано, что временная структура магнитного момента, создаваемого электромагнитами компенсаторами системы компенсации

при питанні сформованими токами, совпадає со структурою магнітного поля, створюваного токопроводами контурів силової цепі трьохфазного розподільного пристрою. Це дозволяє підвищити точність компенсації поля несинусоїдальних токів силової цепі во всіх режимах роботи трифазного розподільного пристрою.

Список літератури: 1. 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. 2. 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. 3. IEC 1000-4-9: 1993. "Electromagnetic compatibility. Part 4: Testing and measuring techniques – Section 9: Pulse magnetic field immunity test. Basic EMC Publication". Edition 1.1. – 2001. – 59 p. 4. IEC 1000-4-10: 1993. "Electromagnetic compatibility. Part 4: Testing and measuring techniques – Section 10: Damped oscillatory magnetic field immunity test. Basic EMC Publication". Edition 1.1. – 2001. – 59 p. 5. Salinas E. Field Mitigation from Secondary Substations / Salinas E. // CARIED 2003. 17th International Conference on Electricity Distribution. – Belgium – 15 May 2003. – 32 p. 6. Лушков В.С. Наукові основи технології компенсації магнітного поля поблизу низьковольтних комплектних пристроїв: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра. техн. наук : спец. 05.09.01 "Електричні машини й апарати" / Лушков В.С.; НТУ "ХПІ". – Харків, 2003. – 36 с. 7. Шидловский А.К., Розов В.Ю. Системы автоматической компенсации внешних магнитных полей энергонасыщенных объектов // Техническая электродинамика. – 1996. – №1. – С. 3-9. 8. Розов В.Ю., Ерисов А.В., Лушков В.С. Особенности снижения внешних магнитных полей распределительных устройств и полупроводниковых преобразователей: Препр. / НАН Украины. Ин-т электродинамики; №791. – К.: 1996. – 47 с. 9. Розов В.Ю., Лушков В.С. Прогнозирование магнитного поля, создаваемого полупроводниковыми преобразователями // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Зб. наук. праць. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2001. – №5. – С. 129-136. 10. Розов В.Ю. Внешние магнитные поля силового электрооборудования и методы их уменьшения: Препр. / НАН Украины. Ин-т электродинамики; № 772. – К.: 1995. – 42 с.

*Надійшла до редколегії 26.03.2011
Рецензент д.т.н., проф. Болюх В.Ф.*