

---

**ПОИСКОВАЯ СИСТЕМА КОМПЕНСАЦИИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕСИММЕТРИИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В ПРИВОДАХ С АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ**

---

Вопросам качества электрической энергии в питающей сети в последние годы уделяется все большее и большее внимание. Растет количество исследований и разработок, посвященных этой проблеме: пассивные фильтрокомпенсирующие устройства, активные компенсаторы гармоник и другие системы [1,2,3]. Успешное решение вопросов качества энергии в сети оставляет без внимания процессы преобразования энергии в самом электрическом двигателе. Авторы полагают – если параметры энергии в сети соответствуют нормам, например [4,5], то и двигатель будет работать хорошо. Однако несимметрия электрических параметров, нарушения в механической части или магнитной системы двигателя приводят к несимметрии или несинусоидальности токов статора и нарушению качества преобразования энергии, равно как и несимметрия или несинусоидальность питающего напряжения [6]. Но понимая проблему, известные авторы [7, 8] направили свои усилия в направлении синтеза алгоритмов управления нечувствительных к параметрическим возмущениям, и, решив задачу управления приводом, по-прежнему процессы вызванные не качественным преобразованием энергии внутри электрической машины оставили без внимания.

В свое время авторами статьи ставилась задача управлением качеством преобразования энергии на основе «показателей качества преобразования энергии» (ПКПЭ) и основные из них приведены в [6]. Разработанный комплекс показателей позволяет перейти к задаче управления качеством преобразования энергии – такого управления электроприводом, чтобы преобразователь энергии – регулятор напряжения или преобразователь частоты, – обеспечивая заданный режим работы электропривода, осуществлял не только преобразование энергии, но и управление качеством ее преобразования. Такое управление, кроме компенсации параметрической несимметрии решает еще ряд таких важных задач как

- обеспечение эффективной работы электроприводов в сетях ограниченной мощности;
- обеспечение эффективной работы электроприводов с учетом влияния сети при ее несимметрии, несинусоидальности и пр. [4];
- снижение влияния электроприводов с отклонениями в параметрах на сеть и другие потребители;
- минимизация потерь мощности, снижение нагрева, шума, вибрации;
- обеспечение требуемых технологических режимов пуска, перегрузочной способности, ПВ и др., а также для электроприводов с отклонениями параметров;
- обеспечение электромагнитной совместимости и снижение электромагнитного воздействия на биологические объекты и человека.

Однако быстрое решение указанной проблемы затруднительно, так как в общем случае, для компенсации несимметрии аналитические уравнения получаются слишком громоздкими, а в отдельных случаях, если существует несимметрия параметров роторных цепей, аналитическое решение вообще невозможно. Тогда решение задачи компенсации может быть легко получено при помощи оптимизационных поисковых алгоритмов: покоординатного спуска, регулярного симплекса или более эффективных, но и более сложных и требующих большего времени поиска (Хукка-Дживса, Нелдера-Мида, деформируемого симплекса). Для микропроцессорной системы управления и компенсации эффективным, например, является метод поиска на основе чисел Фибоначчи.

Так что существует необходимость в формировании систем компенсации несимметрии в асинхронном двигателе на основе поисковых алгоритмов с помощью которых будет осуществляться управление качеством преобразования энергии в асинхронном двигателе при отклонениях электрических и магнитных параметров, а также при его работе с несимметричным и несинусоидальным питающим напряжением.

Таким образом, идея работы заключается в искусственном создании несимметрии и несинусоидальности питающей энергии на статоре АД с целью минимизации переменных составляющих мгновенной мощности и момента с использованием поисковых оптимизационных алгоритмов.

Цель работы состоит в исследовании процессов минимизации переменных составляющих мгновенной мощности и момента в электроприводе с АД с использованием поисковых оптимизационных алгоритмов.

Компенсацию параметрической несимметрии можно осуществить, формируя соответствующие параметры энергии на статоре АД – ее гармонический состав, и тогда задача управления качеством преобразования энергии сводится к отысканию таких несимметричных, и, в общем случае, несинусоидальных напряжений, при которых выполняется условие [9]:

$$\left\{ \sum_{k=2}^{M+N} P_{k_a} + \sum_{k=2}^{M+N} P_{k_b} \right\} \rightarrow \min ; \quad (1)$$

$$\left\{ \sum_{k=2}^{M+N} M_{e.k_a} + \sum_{k=2}^{M+N} M_{e.k_b} \right\} \rightarrow \min , \quad (2)$$

где  $P_{k_a}, P_{k_b}, M_{e.k_a}, M_{e.k_b}$  - амплитуды синусных и косинусных составляющих потребляемой мощности и электромагнитного момента АД.

Решение уравнений (1) и (2) в электроприводах с АД возможно получить формированием соответствующего напряжения на выходе регулятора напряжения или преобразователя частоты (рис.1).

На рис.1 обозначены: ПЭ – преобразователь энергии, СД – синхронный двигатель, ИМ – измеритель мощности, ВМ – вычислитель момента, ИПС – измеритель переменных состояния, РКПЭ – регулятор качества преобразования энергии.

При кажущейся простоте решения уравнений (1) и (2), аналитическое построение регулятора РКПЭ затруднительно, так как требует решения уравнения обратной свертки при нахождении полигармонического спектра потребляемой мощности или электромагнитного момента [9]. Частично, для ограниченного спектра мощности и момента эта задача решена в [6]. При этом аналитические решения получают слишком громоздкими, а в отдельных случаях, если существует несимметрия параметров роторных цепей, аналитическое решение вообще невозможно. Тогда решение задачи компенсации может быть получено при помощи оптимизационных поисковых алгоритмов: покоординатного спуска, регулярного симплекса или более эффективных, но и более сложных и требующих большего времени поиска (Хукка-Дживса, Нелдера-Мида, деформируемого симплекса), а при практической реализации, например, методов поиска на основе чисел Фибоначчи.

При таком подходе РКПЭ реализуется в виде поисковой системы, которая осуществляет поисковый режим на основании значений напряжений и токов в каждой из фаз и определении величины переменной составляющей момента или мощности (рис.2). Алгоритм поиска построен на определении наименее перегруженной в токовом отношении фазы и последующем изменении величины напряжений в других фазах, причем снижение происходит синхронно на одинаковую величину. При этом шаг изменения варьируется в зависимости от результатов предыдущего изменения напряжений. Основными критериями управления являются: сохранение величины постоянной составляющей электромагнитного момента АД, токовая нагрузка фаз, которая не должна превышать номинальную, обеспечение минимальной величины переменной составляющей мгновенной потребляемой мощности.

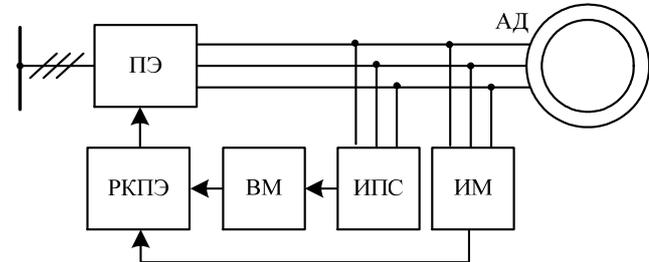


Рис. 1 – Функциональная схема системы компенсации параметрической несимметрии при управлении качеством преобразования энергии в электроприводах с АД

напряжения по известному току статора и заданному моменту [9]. Частично, для ограниченного спектра мощности и момента эта задача решена в [6]. При этом аналитические решения получают слишком громоздкими, а в отдельных случаях, если существует несимметрия параметров роторных цепей, аналитическое решение вообще невозможно. Тогда решение задачи компенсации может быть получено при помощи оптимизационных поисковых алгоритмов: покоординатного спуска, регулярного симплекса или более эффективных, но и более сложных и требующих большего времени поиска (Хукка-Дживса, Нелдера-Мида, деформируемого симплекса), а при практической реализации, например, методов поиска на основе чисел Фибоначчи.

При таком подходе РКПЭ реализуется в виде поисковой системы, которая осуществляет поисковый режим на основании значений напряжений и токов в каждой из фаз и определении величины переменной составляющей момента или мощности (рис.2). Алгоритм поиска построен на определении наименее перегруженной в токовом отношении фазы и последующем изменении величины напряжений в других фазах, причем снижение происходит синхронно на одинаковую величину. При этом шаг изменения варьируется в зависимости от результатов предыдущего изменения напряжений. Основными критериями управления являются: сохранение величины постоянной составляющей электромагнитного момента АД, токовая нагрузка фаз, которая не должна превышать номинальную, обеспечение минимальной величины переменной составляющей мгновенной потребляемой мощности.

Реализованный алгоритм является модификацией покоординатного спуска. Однако в отличие от стандартного алгоритма используется не метод «золотого сечения», а разновидность градиентного метода, когда направление поиска идет в направлении наиболее перегруженной по току фазы статора.

Исследование компенсации параметрической несимметрии и улучшения качества преобразования энергии выполнено на примере АД мощностью 14 кВт методом математического моделирования.

Моделирование произведено для следующих режимов для нагрузки на валу 25%, 50%, 75% и 100% номинальной:

- компенсация несимметрии активных сопротивлений статора 20%,
- компенсация несимметрии индуктивности рассеяния статора 5% и 10%,
- компенсация несимметрии механической системы 5% и 10% вызванная дисбалансом ротора.

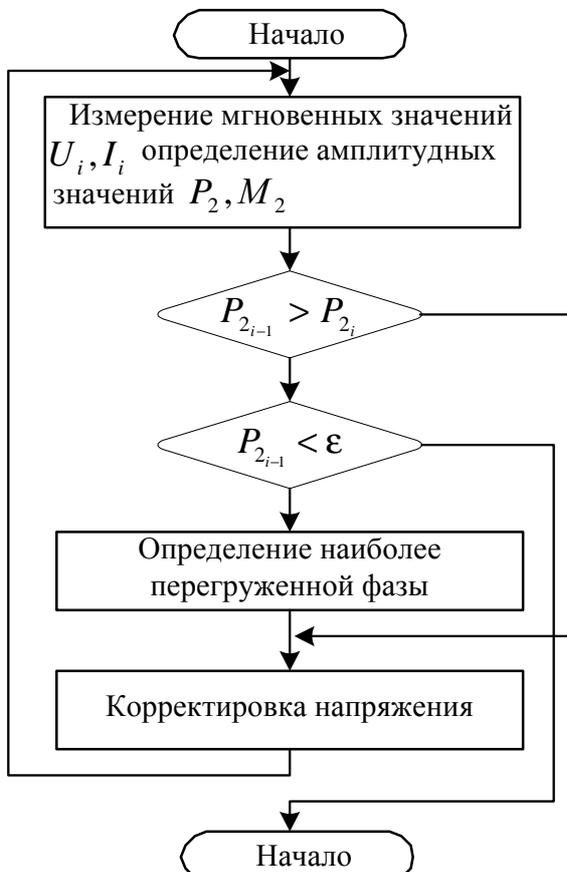


Рис. 2 Алгоритм работы РКПЭ

В качестве примера, на рис. 2-8, показаны только отдельные результаты.

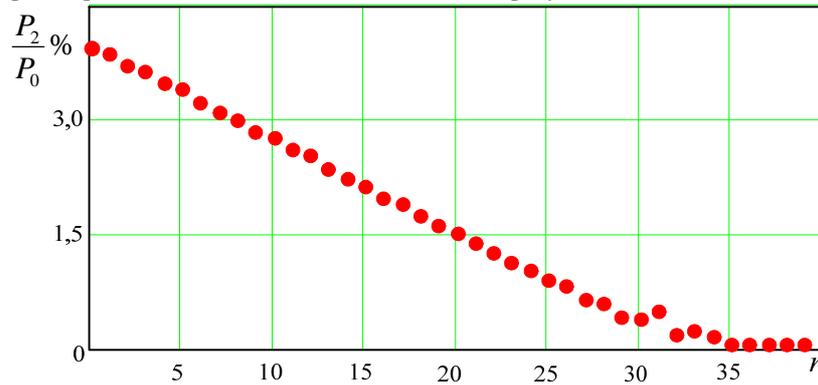


Рис. 3 Процесс пошаговой компенсации несимметрии активных сопротивлений статора 20% АД работающего с нагрузкой  $0.5M_H$

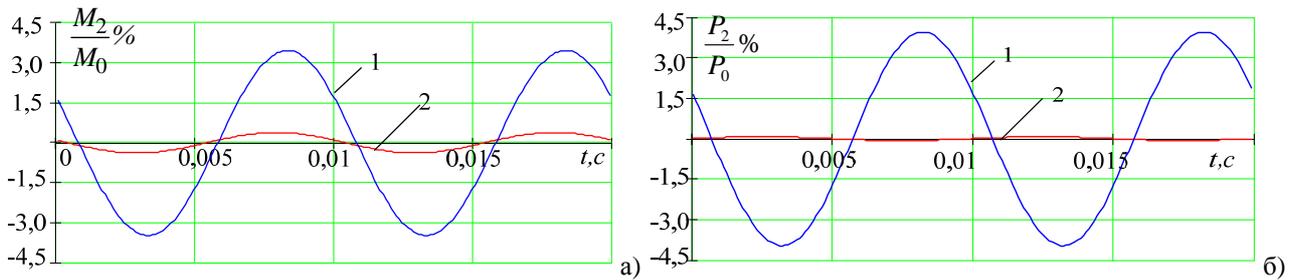


Рис.4 Изменение второй гармоники электромагнитного момента (а) и потребляемой мощности (б) АД с несимметрией активных сопротивлений статора 20% при нагрузке  $0.5M_H$  :

1 – при симметричном питании; 2 – при компенсации несимметрии

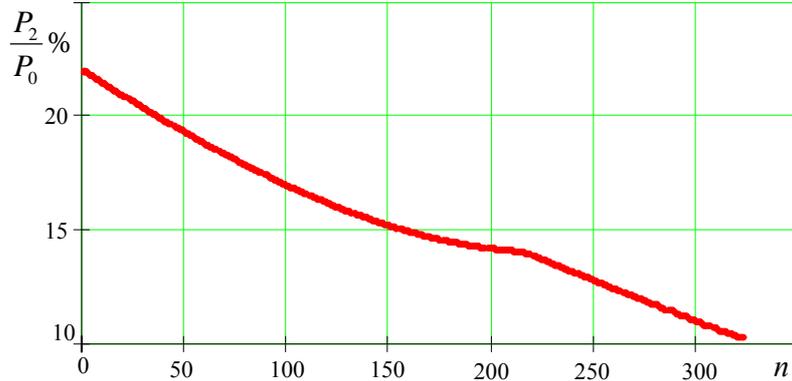


Рис. 5 Процесс пошаговой компенсации несимметрии индуктивностей рассеяния статора 5% АД работающего с нагрузкой  $0.5M_H$

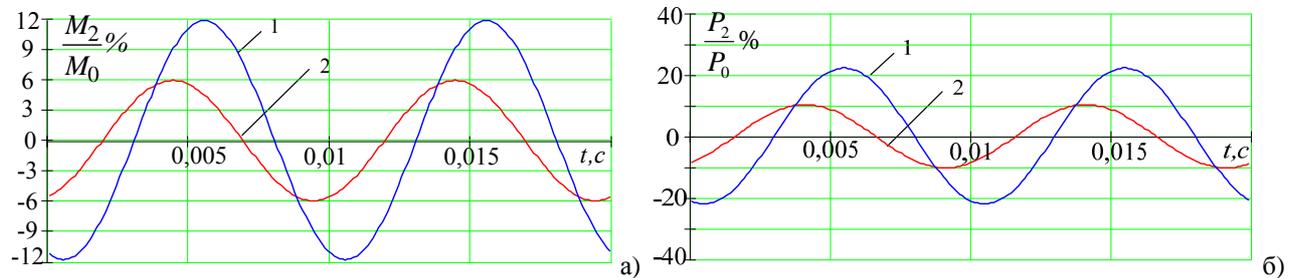


Рис.6 Изменение второй гармоники электромагнитного момента (а) и потребляемой мощности (б) АД с несимметрией индуктивностей рассеяния статора 5% при нагрузке  $0.5M_H$  :

1 – при симметричном питании; 2 – при компенсации несимметрии

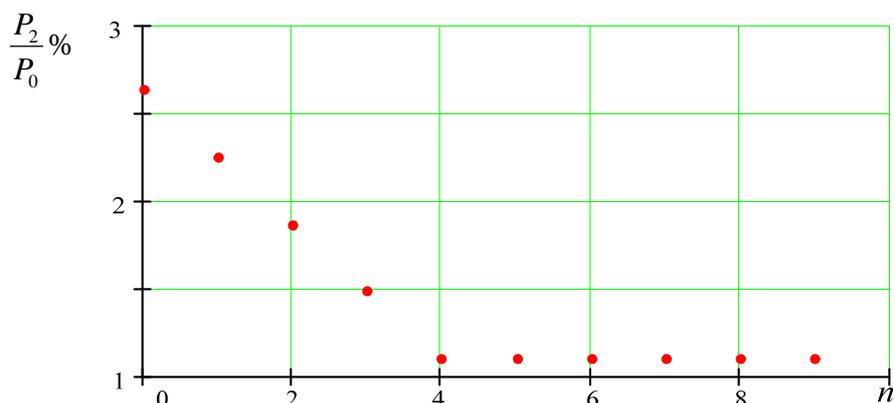


Рис.7 Процесс пошаговой компенсации несимметрии механической системы 5% АД при работе на холостом ходу

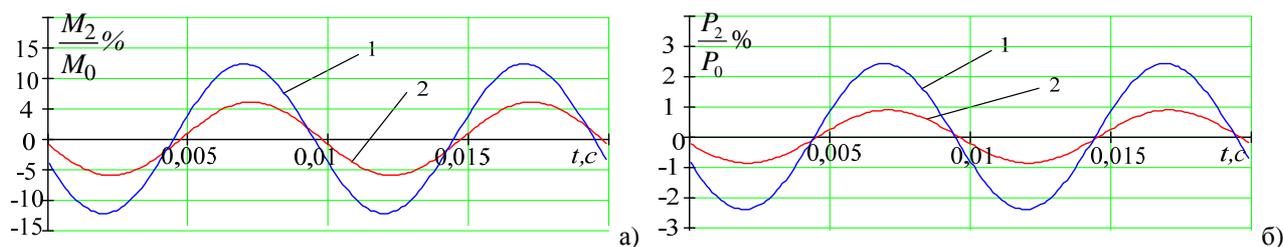


Рис.8 Изменение второй гармоники электромагнитного момента (а) и потребляемой мощности (б) АД с несимметрией механической системы 5% при работе на холостом ходу  
1 – при симметричном питании; 2 – при компенсации несимметрии

**Выводы.** Предложен способ управления качеством преобразования энергии в АД в составе регулируемых электроприводов. Управление осуществляется средствами преобразователя питания статорных цепей АД и не требует дополнительных специальных систем или устройств. Компенсация параметрической несимметрии АД обеспечивается искусственным созданием несимметрии и несинусоидальности питающей энергии на статоре АД с использованием поисковых оптимизационных алгоритмов, что позволяет минимизировать переменные составляющие мгновенной мощности и момента.

Проведенные авторами исследования на математических моделях показали возможность снизить в 9 раз переменную составляющую электромагнитного момента и в 54 раза – потребляемой мощности при несимметрии активных сопротивлений статора, а также соответственно 3.5 и 3.7 – при несимметрии индуктивностей рассеяния статора и 2 и 2.7 – при несимметрией механической системы. Неполная, в отдельных случаях, компенсация параметрической несимметрии обусловлена сложным многочастотным характером изменения тока статора и наличия гармоник выше второй, которые при использовании показанных алгоритмов не компенсировались.

#### Литература

1. Шрейнер Р.Т. Активный фильтр как новый элемент энергосберегающих систем электропривода / Р.Т. Шрейнер, А.А. Ефимов // *Электричество*. – 2000. – № 3. – С. 46-54.
2. Шидловский А.К. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / А.К. Шидловский, А.Ф. Жаркин. – К.: Наук. думка, 2005. – 210 с.
3. С.С.М. Moura, М.Е.Л. Tostes, Е.Р. Santos, R.C.L. Oliveria, T.M.M.Branco, U.H. Bezerra Determination of the R-L-C Parameters of a Passive Harmonic Filter Using Genetic Algorithm // *IEEE Conf. on Harmonics and Quality of Power*. – Vol. 2. – 2002. – PP. 495-500.
4. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. ИПК. – М: Издательство стандартов. –1998. – 15 с.
5. Характеристики напряжения электричества, поставляемого системами распределения общего назначения. Европейский стандарт EN 50160, 1994. – Режим доступа <http://www.eurelectric.org/publications/>
6. Черный А.П., Родькин Д.И., Калинов А.П., Воробейчик О.В. Мониторинг параметров электрических двигателей электромеханических систем: Монография. – Кременчук: ЧП Щербатых А.В., 2008. – 244 с.
7. Потапенко Е.М. Робастные алгоритмы векторного управления асинхронным приводом / Потапенко Е.М., Потапенко Е.Е. – Запорожье: ЗНТУ, 2009. – 352 с.
8. Peresada S., Tilli A. and Tonielli A. Theoretical and experimental comparison of indirect field-oriented controllers for induction motors // *IEEE Trans. on Power Electronics*. –2003. –Vol. 18, No. 1. –P. 151–163.
9. Черный А.П., Родькин Д.И., Бердай Абдельмажид. Комплексная задача управления качеством преобразования энергии электромеханическими системами / *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 3(19). – С.316 – 319.