

УДК 621.313

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ В ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОМ АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Волков А. В., д.т.н., проф., Скалько Ю. С.

Запорожский национальный технический университет

69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64

E-mail: epa@zntu.edu.ua

Розроблено та досліджено оптимальне за мінімумом загальних втрат в частотно-регульованому асинхронному електроприводі енергозберігаюче керування. Виконано порівняння з відомими законами частотного керування.

Ключові слова: енергозберігаюче керування, асинхронний електропривод, інвертор.

Energy-saving control optimal due to total power losses minimum in frequency-controlled asynchronous electric drive is developed and investigated. Comparison with known control laws is presented.

Keywords: energy-saving control, asynchronous drive, inverter.

Введение. В последние годы во всем мире происходит удорожание электроэнергии и, вызванное этим, обострение проблемы энергосбережения. В связи с этим становится чрезвычайно важной задача энергосберегающего управления частотно-регулируемыми (ч-р) асинхронными электроприводами (ЭП), которые находят ныне широкое применение во всех отраслях хозяйства.

Анализ предыдущих исследований. Несмотря на большое внимание, которое уделяется в научно-технической литературе энергосберегающему управлению в указанных ЭП, оно не отвечает потребностям практики. А именно, в большинстве известных энергосберегающих законах управления [1–3] минимизируются только основные (т. е. вызванные основными гармониками статорного напряжения и тока) потери в асинхронном двигателе (АД), а модуляционными потерями (вызванными в двигателе высокочастотными составляющими тока) пренебрегают. Также, в большинстве известных работ [1–4] не учитываются потери в преобразователе частоты. Наиболее полный учет потерь мощности в ч-р асинхронном ЭП выполнен в [5], где учитываются одновременно основные потери в преобразователе частоты и двигателе, но при этом модуляционными потерями в указанных элементах ЭП пренебрегают. Таким образом, существующие в настоящее время способы энергосберегающего управления не обеспечивают оптимального управления по минимуму общих потерь в ч-р асинхронном ЭП и фактически не оптимальны по данному критерию.

Цель работы. Разработка и исследование оптимального по минимуму общих потерь в ч-р асинхронном ЭП энергосберегающего управления.

Материал и результаты исследования. Эффективное решение задачи минимизации суммарных

потерь электропривода может быть получено только с использованием математической модели, учитывающей все составляющие потерь в электроприводе.

Суммарные потери мощности ΔP_{Σ} в ч-р асинхронном ЭП состоят из потерь мощности в выпрямителе $\Delta P_{в}$, инверторе $\Delta P_{и}$ и двигателе $\Delta P_{д}$:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{в} + \Delta P_{и} + \Delta P_{д}. \quad (1)$$

Расчет потерь в выпрямителе рассмотрен в [6]. Потери в двигателе, содержащие основную и модуляционную составляющие, рассчитываются по формулам из [4].

Рассмотрим потери мощности $\Delta P_{и}$ в инверторе, которые состоят из статических $\Delta P_{ис}$ и динамических $\Delta P_{ид}$ потерь мощности [7]:

$$\Delta P_{и} = \Delta P_{ис} + \Delta P_{ид}. \quad (2)$$

Первая из указанных составляющих рассчитывается по известному соотношению из [5].

Получим приближенную формулу для расчета значения динамических потерь мощности $\Delta P_{ид}$, используя формулу из [7]:

$$\Delta P_{ид} = \frac{1}{T_1} \left[\sum E_{on} (I_{v on}) + \sum E_{off} (I_{v off}) \right], \quad (3)$$

где E_{on} и E_{off} – соответственно энергии включения и выключения силового ключа, зависящие от текущего значения тока через ключ I_v в момент коммутации; T_1 – период основной частоты.

Принимая во внимание линейную зависимость энергии на коммутацию (включение или выключение силового ключа) от тока через ключ, получаем соотношение:

$$\Delta P_{ид} = \frac{1}{T_1} \left[K_1 I_{v on} + K_2 I_{v off} \right]. \quad (4)$$

Учитывая то, что в автономном инверторе напряжения с широтно-импульсной модуляцией

(АИН-ШИМ) при открытии одного силового ключа происходит закрытие другого ключа в той же фазе моста, и при этом ток включения открывающегося ключа равен току выключения для закрывающегося ключа, рассчитаем энергию коммутации для одной фазы инвертора:

$$E_{\text{п}} = E_{\text{он}} + E_{\text{оф}} = K_1 I_{\text{в}} + K_2 I_{\text{в}} = K I_{\text{в}} \quad (5)$$

За период основной гармоники T_1 происходит четное количество коммутаций в каждой фазе моста инвертора, поэтому для одного ключа энергию коммутации можно принять равной:

$$E_{\text{к}} = \frac{K}{2} I_{\text{в}} = K' I_{\text{в}} \quad (6)$$

Динамические потери для одного силового ключа за период T_1 находятся в виде:

$$\Delta P_{\text{иD}} = \frac{1}{T_1} K' \sum I_{\text{в}} \quad (7)$$

Используя приближенное равенство

$$\int I_{\text{в}} dt \approx \sum I_{\text{в}} \Delta t, \quad (8)$$

получаем соотношение:

$$\sum I_{\text{в}} \approx \frac{1}{\Delta t} \int_0^{T_1} I_{\text{в}} dt = f_{\text{п}} T_1 I_{\text{в ср}} \quad (9)$$

Подставляя (9) в (7), найдем

$$\Delta P_{\text{иD}} = K' f_{\text{п}} I_{\text{в ср}} \quad (10)$$

Учитывая пропорциональность среднего тока через ключ от амплитуды первой гармоники статорного тока, получаем:

$$\Delta P_{\text{иD}} = \alpha_{\text{п}} K_{\text{D}} I_1, \quad (11)$$

где K_{D} – коэффициент пропорциональности, связывающий амплитуду I_1 основной гармоники фазного статорного тока с динамическими потерями мощности $\Delta P_{\text{иD}}$ инвертора при частоте $f_{\text{п}}$ модуляции силовых ключей, равной 50 Гц; $\alpha_{\text{п}}$ – относительное значение частоты модуляции ($\alpha_{\text{п}} = f_{\text{п}} / 50$).

С использованием указанных расчетных формул производится минимизация суммарных потерь в асинхронном ЭП с АИН-ШИМ в два этапа. Сначала находим оптимальное соотношение U_1/f_1 , обеспечивающее минимизацию основных потерь в электроприводе. Для этого варьируется амплитуда U_1 основной гармоники выходного напряжения АИН-ШИМ при определенной заданной основной частоте f_1 . При этом находится такое значение отношения U_1/f_1 , при котором суммарные потери в электроприводе минимальны. Затем находим оптимальное значение $\alpha_{\text{п}}$ частоты модуляции, варьируя ее при найденном значении U_1/f_1 , достигая этим минимизации модуляционных потерь в электроприводе.

Для моделирования системы электропривода была использована цифровая модель [8] асинхронного электропривода насоса со скалярным управлением (двигатель 4АРМП мощностью 1600 кВт), до-

полненная разработанной моделью суммарных потерь в электроприводе.

На рис. 1 представлены графики рассчитанных оптимальных значений (в функции амплитуды I_1 основной гармоники статорного тока двигателя): модуляционной частоты $f_{\text{п}}^{\text{о}}$, относительного значения ($\Psi_{\text{r}}/\Psi_{\text{гн}}$) потокосцепления ротора АД и соотношения

$$\xi = (U_1/f_1)/(U_{1\text{н}}/f_{1\text{н}}), \quad (12)$$

характеризующего изменение закона частотного управления АД (где $U_{1\text{н}}$ и $\Psi_{\text{гн}}$ – номинальные значения амплитуд фазных статорного напряжения и потокосцепления ротора двигателя соответственно, $f_{1\text{н}}$ – номинальное значение основной частоты).

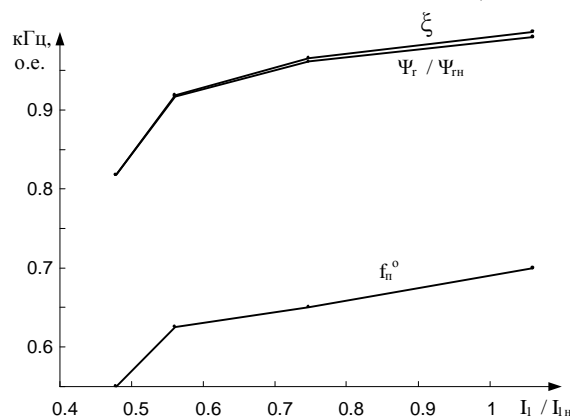


Рисунок 1 – Зависимости рассчитанных оптимальных значений $f_{\text{п}}^{\text{о}}$, ξ , $\Psi_{\text{r}}/\Psi_{\text{гн}}$

По результатам анализа приведенных зависимостей предложены вычислители, реализующие оптимальное управление для скалярного и для векторного управления.

Для скалярного управления на основе заданного значения основной частоты f_1^* выходного напряжения и текущего значения амплитуды первой гармоники статорного тока при помощи функционального блока F_1 вычисляется оптимальное значение задания амплитуды U_1^* статорного напряжения (рис. 2, а). Функциональный блок F_1 реализует функцию $u = K\sqrt{x}$, аппроксимирующую зависимость $\xi(I_1)$, показанную на рис. 1.

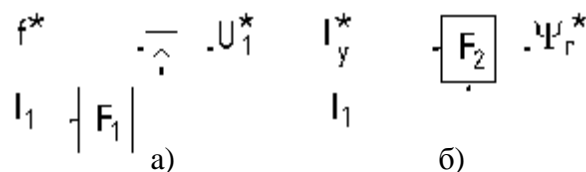


Рисунок 2 – Блок-схема вычислителя

При векторном управлении в функциональном блоке F_2 через заданное значение активной составляющей I_y статорного тока и текущее значение амплитуды I_1 первой гармоники статорного тока опре-

деляется оптимальное заданное значение потоко- сцепления ротора Ψ_r^* (рис. 2, б). Функциональный блок F_2 реализует зависимость Ψ_r^* (I_y^*, I_1) из рис. 3.

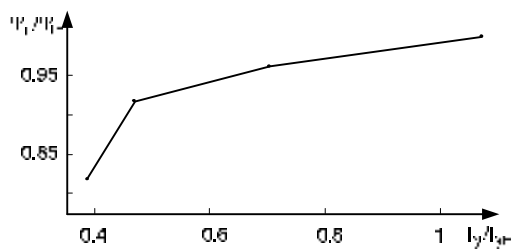


Рисунок 3 – Аппроксимирующая зависимость $\xi(I_1)$

Также было проведено сравнение суммарных потерь в электроприводе для различных законов частотного управления.

Сравнивались следующие законы управления:

- пропорциональный закон $U_1/f_1 = \text{const}$;
- закон постоянства потоко- сцепления ротора $\Psi_r = \text{const}$;

– экономичный закон (закон М.П. Костенко);

– закон минимума статорного тока;

– закон минимума основных потерь двигателя;

– закон минимума суммарных потерь электро- привода.

Зависимости суммарных потерь электропривода от частоты вращения ротора при различных моментах нагрузки приведены: на рис. 4 - 6, где использо- ваны следующие обозначения: 1 – пропорци- ональный закон, 2 – закон постоянства потоко- сцепления ротора, 3 – экономичный закон, 4 – закон минимума статорного тока, 5 – закон минимума основных потерь, 6 – закон минимума общих потерь электропри- вода.

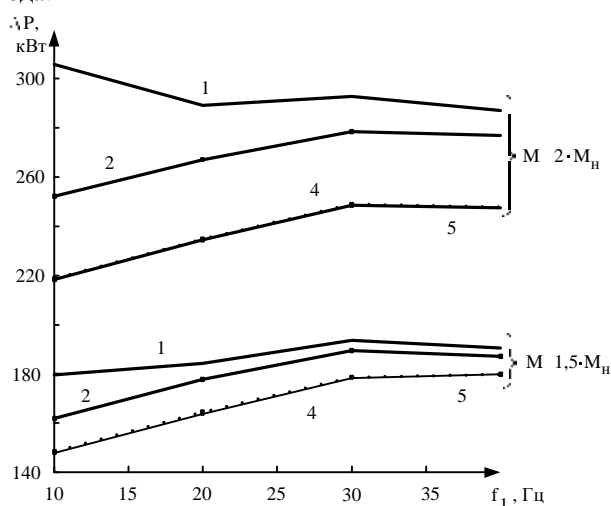


Рисунок 4 – Зависимость суммарных потерь электропривода от частоты вращения ротора при постоянном моменте нагрузки, большем номинального

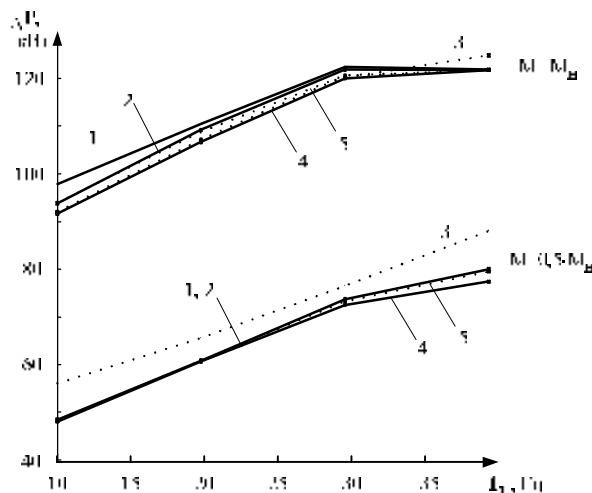


Рисунок 5 – Зависимость суммарных потерь электропривода от частоты вращения ротора при постоянном моменте нагрузки, меньшем номинального

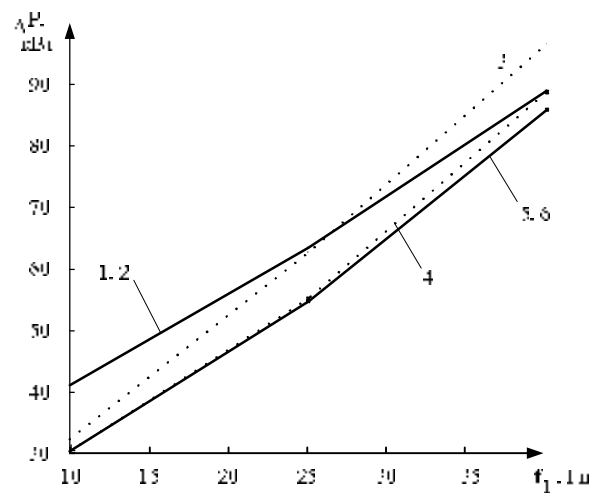


Рисунок 6 – Зависимость суммарных потерь электропривода от частоты вращения ротора при вентиляторном моменте нагрузки

На рис. 7 представлен график изменения общего коэффициента полезного действия (КПД) при пере- ходе от пропорционального к энергосберегающему управлению для рассматриваемого 4-р асинхронно- го ЭП с синусоидальной ШИМ, представленного на рис. 7. Изменение КПД $\Delta\eta$, рассчитаного из зависи- мости:

$$\Delta\eta = (P_{\text{мех}} - \Delta P_{\text{мех}}) \left[\frac{1}{P_{\Sigma}^0} - \frac{1}{P_{\Sigma}} \right], \quad (13)$$

где P_{Σ}^0 и P_{Σ} – общая потребляемая мощность элек- тропривода для оптимального и пропорционального закона управления соответственно.

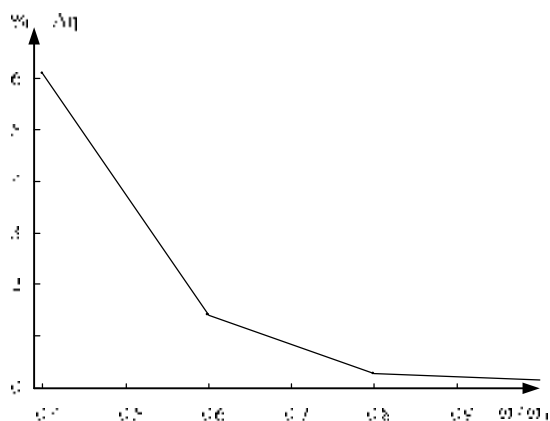


Рисунок 7 – Зависимость изменения общего КПД при переходе от пропорционального к энергосберегающему управлению

Выводы. 1. Разработанное энергосберегающее управление позволяет достичь в асинхронном ЭП с АИН-ШИМ наименее возможного потребления электроэнергии при сохранении требуемых регулировочных характеристик электропривода и незначительном усложнении системы автоматического управления электроприводом.

2. Пропорциональный и экономичный законы частотного управления АД являются наиболее энергозатратными, и поэтому их использование для электроприводов насосов невыгодно с позиции энергосбережения.

3. Установлено, что закон частотного управления по минимуму статорного тока наиболее близок (практически совпадает) с предложенным управлением по минимуму общих потерь в ч-р асинхронном ЭП с АИН-ШИМ, а потому может быть успешно использован в качестве энергосберегающего управления в указанном электроприводе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

1. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Наука, 1966. – 298 с.
2. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Энергия, 1974. – 328 с.
3. Шрейнер Р.Т., Дмитренко Ю.А. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 224 с.
4. Пивняк Г.Г., Волков А.В. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией. – Днепропетровск: НГУ, 2006. – 470 с.
5. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. – М.: Академия, 2004. – 256 с.
6. Волков А.В., Скалько Ю.С. Потери мощности в системе «автономный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией – асинхронный двигатель» // Електромашинобудування та електрообладнання: Тематичний випуск. Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. – Київ: Техніка. – 2006. – Вип. 66. – С. 309-310.
7. Сорин Н.Л., Колпахчян П.Г., Янов В.П. Выбор способа моделирования IGBT-транзистора в системе «статический преобразователь – асинхронный двигатель» // Электротехника. – 2004. – №4. – С. 7-10.
8. Волков А.В., Скалько Ю.С. Цифровая модель частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением // Электротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя: ЗНТУ. – 2005. – №2. – С. 75-81.

Стаття надійшла 08.04.2007 р.