

потенциал на базе транзистора VT1 соответствующего датчика 1, что приводит к смещению ВАХ АЛД вправо (на рис. 2 – прерывистая линия). Если напряжение  $U'_B$  оказывается больше напряжения источника  $U_{ист}$ , в L-C контуре возникают колебания. Во вторичной обмотке трансформатора TV наводится э.д.с., промежуточное реле К срабатывает, сигнализируя о достижении напряжения нулевой последовательности на контролируемом двигателе порогового значения. Диоды VD2-VD4 являются фильтром напряжения нулевой последовательности.

Разработанное устройство позволяет контролировать несимметрию напряжений группы электродвигателей, например, может быть использован в схемах их защиты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Патент. МПК (2007) G01K 7/16, Н 02 Н 7/09. Пристрій контролю електродвигунів при несиметрії напруги /А.Я. Чураков, І.О. Попова, С.Ф. Курашкін (Україна). Заяв.17.05.2007; Опубл.15.12.2007.

**Прищепов М.А., д.т.н., доцент, Иванов Д.М., аспирант,  
Прищепова Е.М., ст. преподаватель  
УО «Белорусский государственный аграрный технический  
университет», Минск, Республика Беларусь**

#### **СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ЧАСТОТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ СКОРОСТИ**

**Ключевые слова:** частота питающего напряжения, число пар полюсов, синхронная угловая скорость, механические характеристики.

**Аннотация.** В статье рассмотрены разомкнутые системы частотного скалярного управления и влияние на них сделанных допущений.

Частотный метод регулирования угловой скорости АД является наиболее энергоэффективным и широко используемым. Принцип частотного метода регулирования скорости АД заключается в том, что изменяя частоту  $f_1$  питающего напряжения  $U_1$  при неизменном числе пар полюсов  $p$  можно изменять синхронную угловую скорость магнитного поля статора  $\omega_0$ , в соответствии с выражением [1]:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p}. \quad (1)$$

Изменяя частоту  $f_1$  питающего напряжения  $U_1$ , можно получить семейство искусственных механических характеристик АД. При этом следует учесть, что с изменением частоты  $f_1$  питающего напряжения  $U_1$  изменяется и величина потока возбуждения  $\Phi_1$  АД, пропорционально отношению питающего напряжения  $U_1$  к его частоте  $f_1$ , т.е.  $\Phi_1 \equiv U_1/f_1$ . Поэтому для получения высоких энергетических показателей электропривода (ЭП) одновременно с изменением частоты  $f_1$  питающего напряжения  $U_1$  нужно регулировать и его величину, причём регулирование величины напряжения  $U_1$  следует производить таким образом, что бы абсолютное скольжение АД на искусственной механической характеристике было близким к номинальному абсолютному скольжению на естественной характеристике. Для обеспечения этого условия при разработке ЭП необходимо согласовывать искусственные механические характеристики АД с его нагрузкой, т.е. с механическими характеристиками производственных механизмов.

Соответственно, при частотном управлении в электроприводе реализуется один из статических законов частотного управления [2]:

$$1) \frac{U_1}{f_1} = \frac{U_{1H}}{f_H} = const; \quad (2)$$

$$2) \frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{f_H}} = const; \quad (3)$$

$$3) \frac{U_1}{f_1^2} = \frac{U_{1H}}{f_H^2} = const; \quad (4)$$

4) оптимальный закон Костенко:

$$\frac{U_1}{U_{1H}} = \frac{f_1}{f_H} \cdot \sqrt{\frac{M_C}{M_H}}; \quad (5)$$

5) закон постоянства потокосцепления статора:

$$\Psi_1 = const \text{ или } \frac{E_s}{f_1} = const \text{ или } IR \text{ компенсации;}$$

6) закон постоянства потокосцепления цепи намагничивания:

$$\Psi_m = const \text{ или } \frac{d\Psi_m / dt}{f_1} = const \text{ или } \frac{E_1}{f_1} = const;$$

7) закон постоянства потокосцепления ротора:

$$\Psi_2 = const \text{ или } \frac{d\Psi_2 / dt}{f_1} = const \text{ или } \frac{E'_2}{f_1} = const;$$

8) закон постоянства абсолютного скольжения:

$$s_a = s \cdot \alpha = const \text{ или } s_a = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} \cdot \frac{\omega_1}{\omega_{1H}} = const$$

9) минимизация тока статора  $I_1 \rightarrow \min$  ;

10) закон максимальной эффективности  $\eta \rightarrow \max$  ( $P_1 \rightarrow \min$ )

и другие,

где  $\omega_1, f_1$  – синхронная угловая скорость электромагнитного поля и соответствующая ей частота питающего напряжения статора АД, рад/с, Гц;

$U_1$  – значение питающего напряжения статора АД, В;

$\omega_{1H}, f_H$  – номинальная угловая скорость электромагнитного поля и соответствующая ей номинальная частота питающего напряжения статора АД, Гц;

$U_{1H}$  – номинальное напряжение питания статора, В;

$M_C$  – статический момент на рабочем валу механизма, Н·м;

$M_H$  – номинальный момент на рабочем валу механизма при номинальной угловой скорости, Н·м;

$\omega$  – угловая скорость ротора, рад/с;

$\Psi_1, \Psi_2, \Psi_m$  – потокосцепления, соответственно, статора, ротора, и взаимоиנדукции, В·с;

$E_s, E_1, E'_2$  – ЭДС, соответственно, статора, взаимоиנדукции и ротора, приведенная к обмотке статора, В;

$\alpha = f_1 / f_H$  – относительное значение частоты питающего напряжения;

$s$  – скольжение АД, о.е.;

$s_a$  – абсолютное скольжение АД, о.е.;

$I_1$  – текущий ток статора, А;

$P_1$  – потребляемая мощность АД, Вт;

$\eta$  – КПД двигателя.

Формирование закона может выполняться как в разомкнутом, так и в замкнутом контуре управления.

Область применения разомкнутых систем управления ограничивается механизмами с небольшим диапазоном регулирования скорости и механизмами с известной механической характеристикой, т.е. зависимостью статического момента  $M_c$  на рабочем валу механизма от угловой скорости  $\omega$   $M_c = f(\omega)$ . В частности, жёсткое задание зависимости  $U_1 = f(\omega_1)$  хорошо подходит для управления механизмами насосно-вентиляторной группы.

Если механическая характеристика нагрузки  $M_c = f(\omega)$  известна, то расчёт зависимости  $U_1 = f(\omega_1)$  может быть выполнен на основе статической модели АД с учётом выбранного закона частотного управления. Пока закон частотного управления не задан, задача расчёта  $U_1 = f(\omega_1)$  по  $M_c = f(\omega)$  решается неоднозначно.

Приведенные выше зависимости законов частотного управления справедливы для идеализированного двигателя, в котором сделаны следующие допущения:

- активное сопротивление обмотки статора равно нулю;
- магнитная система АД не насыщена;
- отсутствуют потери в стали магнитной системы АД.

Далее возьмём двигатель серии АИР160S2 [3] и построим для него искусственные механические характеристики, в двигательном и генераторном режимах при регулировании по наиболее часто используемому закону  $U/f = const$  и значениях частоты напряжения обмотки статора 50, 25, 10, 5 Гц (рис. 1).

Механическая характеристика  $M=f(\omega)$  АД при переменных значениях величины и частоты напряжения питания определяется выражением [4]:

$$M = \frac{3 \cdot U_1 \cdot r'_2}{\omega_0 \cdot S \cdot \left[ x_K^2 \cdot a^2 + \left( r_1 + \frac{r'_2}{S} \right)^2 + \left( \frac{r_1 \cdot r'_2}{S \cdot x_\mu \cdot a^2} \right)^2 \right]}, \quad (6)$$

где  $U_1$  – фазное напряжение питания обмоток статора асинхронного двигателя, В;

$\alpha=f_i/f_{IH}$  – относительное значение частоты питающего напряжения;

$r_1$  – активное сопротивление обмотки статора, Ом;

$r'_2$  – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, Ом;

$x_K$  – индуктивное сопротивление короткого замыкания Ом;

$x_\mu$  – индуктивное сопротивление ветви намагничивания, Ом;

$s$  – скольжение АД, о.е.

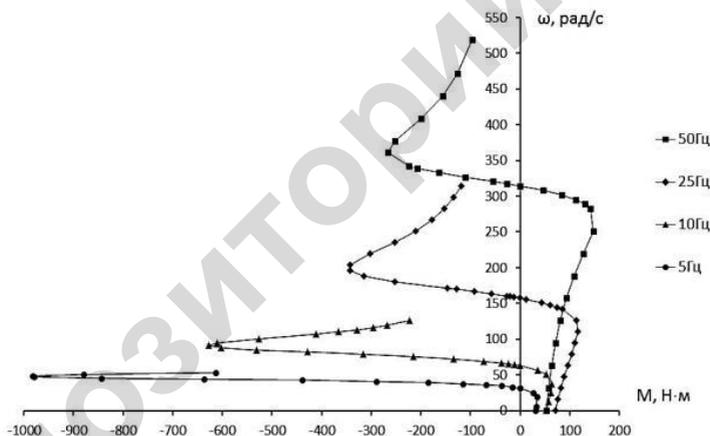


Рисунок 1. Искусственные механические характеристики  $M=f(\omega)$ , при различных частотах питающего напряжения статора и законе регулирования  $U/f=\text{const}$  для двигателя АИР160S2

Анализ полученных механических характеристик АД (рис.1) показывает, что максимальный или критический момент в генераторном режиме больше, чем в двигательном при одной и той же частоте  $f_i$  напряжения питания  $U_1$  статора, и в противоположность

двигательному режиму возрастает с понижением частоты  $f_1$  и напряжения  $U_1$  статора АД. Это явление обусловлено возрастающей ролью активного сопротивления статора. При относительной частоте напряжения питания статора  $\alpha=1\dots 0,5$  двигатель работает в условиях близких к номинальным, т.е. поток возбуждения практически остаётся неизменным в силу незначительных относительных потерь в статоре. При дальнейшем уменьшении  $\alpha$  происходит ощутимое снижение потока возбуждения, обусловленное значительными относительными потерями в активном сопротивлении статора, так как ток статора  $I_1 \equiv M_c = const$ . Соответственно, при таком снижении частоты  $f_1$  и величины напряжения  $U_1$  статора в двигательном режиме значительно снижается развиваемый критический момент на валу двигателя, а в генераторном режиме при преобразовании механической энергии в электрическую с рекуперацией её в сеть он значительно возрастает, тем самым покрывая относительно возрастающие потери в статоре АД. В итоге это снижает диапазон регулирования скорости АД.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Прищепов М.А., Иванов Д.М., Прищепова Е.М. Расчёт статических характеристик асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором в двигательном и генераторном режимах при частотном регулировании скорости и стабилизации потока возбуждения статора // Агропанорама, 2016. - №6. – с.20-30.
2. Прищепов М.А., Прищепова Е.М., Иванов Д.М. Расчёт статических характеристик асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором в двигательном и генераторном режимах при частотном управлении скоростью и стабилизации потока возбуждения // Агропанорама, 2017. - №2. – с.26-36.
3. Асинхронные двигатели каталог ОАО «Могилёвский завод «Электродвигатель» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mez.by>. – Дата доступа: 04.10.2017.
4. Чернышев А.Ю., Дементьев Ю.Н., Чернышев И.А / Электропривод переменного тока: учебное пособие; Томский Политехнический Университет. - Томск: Издательство Томского Политехнического университета, 2011. - 203 с.