



*In the articles there are presented two systems of vector asynchronous electric drives, invariant to vibrating load moment:*  
 1) the traditional  $x$ -network of rectification in direct current element is used, and also the positive back coupling on oscillating term of load moment is embedded for guarantee of invariance;  
 2) in the direct current element there is applied active rectifier, and for guarantee of invariance there is used the positive back coupling on full load moment.  
 The presented in the article arguments prove advantage of the second system over the first one.

А. И. РОЖКОВ, РУП "БМЗ"

УДК 62-83:621.313

## ВЕКТОРНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ИНВАРИАНТНЫЙ ПО МОМЕНТУ НАГРУЗКИ С АКТИВНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ ДЛЯ МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

### Введение

Проблема обеспечения инвариантности в асинхронных электроприводах известна и рассмотрена в [1]. Однако предложенные приемы не обеспечивают высокие энергетические показатели электропривода. Принимая во внимание государственную политику в области энергосбережения и ужесточение контроля за рациональным и качественным потреблением электроэнергии, остро встает вопрос о повышении коэффициента мощности, КПД, улучшении гармонического состава потребляемых из сети токов.

### Цель работы

1. Синтезировать систему автоматического управления (САУ) векторным асинхронным электроприводом инвариантным к колебательному моменту нагрузки с высокими энергетическими показателями.

2. Изучить целесообразность применения данной системы в машине непрерывного литья заготовок.

### Способ решения задачи

Поставленную цель можно достичь использованием в САУ векторным асинхронным инвариантным к колебательному моменту нагрузки электроприводом активного преобразователя энергии. При синтезе использовали методики построения инвариантных систем, разработанные в УО ГТУ им. П.О. Сухого, а также результаты работы в области активных преобразователей энергии для регулируемых электроприводов переменного тока Новоуральского государственного технологического института [1, 2].

### Машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ)

Первоочередной задачей с момента выхода металла из сталеплавильной печи является формирование заготовки (слитка). Это осуществляется

в МНЛЗ кристаллизатором, который, имея водяную рубашку охлаждения, формирует на поверхности слитка корочку из успевшего остыть металла. Для исключения приваривания к стенкам и, следовательно, разрушения образовавшегося твердого верхнего слоя слитка, приводящее к прорыву жидкого металла, используется осцилляционный механизм. Принцип его работы заключается в совершении периодических колебаний, приводящих в движение весь кристаллизатор. Данные колебания совершаются за счет вращения электродвигателем эксцентрикового механизма.

Согласно данным, приведенным в [3], частота осцилляции должна составлять 4 Гц, при этом точность регулирования скорости вращения вала двигателя должна быть на уровне 2%. Частота 4 Гц соответствует 251,28 рад/с (2400 об/мин) при переходе к валу двигателя. Для расчета момента нагрузки приводного электродвигателя была получена следующая зависимость:

$$M(t) = 5,1106 \sin(25,132t) + 27,731 \sin(25,132t) - 2,208 \sin(2 \cdot 25,132t) + 1,642, \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1)$$

Из выражения (1) видно, что в момент нагрузки присутствует колебательная составляющая с удвоенной частотой, равной  $2 \cdot 25,132$  рад/с (8 Гц). Подобные результаты были получены и для определения приведенного к валу двигателя момента инерции всего механизма осцилляции:

$$J(t) = 3,443 \cdot 10^{-4} - 3,443 \cdot 10^{-4} \cos(2 \cdot 25,132t) + 0,013, \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2)$$

Выражение (2) показывает, что в гармоническом законе изменения момента инерции присутствует удвоенная частота (8 Гц).

При выборе двигателя по эквивалентному моменту, согласно (1) и (2), остановились на АД типа 4А112М2У3 номинальной мощностью 7500 Вт, скоростью холостого хода 314,1 рад/с

(3000 об/мин), номинальным КПД 0,875, номинальным коэффициентом мощности 0,88, номинальным моментом 24,489 Н·м.

При сравнении паспортных данных, а именно номинального момента, выяснилось, что максимальная величина момента нагрузки из выражения (1) составляет 35,042 Н·м, что заметно выше номинального значения. Это говорит о том, что при большой частоте колебаний установки требуется обеспечить высокую точность регулирования скорости вращения вала двигателя за счет надежной компенсации влияния колебательной составляющей момента.

### Обеспечение инвариантности

Развитие современных способов цифрового построения САУ, высокая надежность асинхронных двигателей (АД), возможность построения систем с частотно-токовым управлением с возможностью регулирования момента двигателя предопределили использование векторных асинхронных приводов переменного тока для МНЛЗ. Согласно [1], при частотно-токовом управлении АД и поддержании постоянства потокосцепления ротора статическая характеристика принимает вид, аналогичный механической характеристике двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ):

$$\omega = \omega_1 - \frac{2R_r}{3\Psi_{rx}^2} M_c, \quad (3)$$

где  $\omega$  — скорость вращения ротора;  $\omega_1$  — текущая скорость вращения поля статора;  $R_r$  — активное сопротивление ротора АД;  $\Psi_{rx}$  — потокосцепление ротора;  $M_c$  — момент нагрузки на валу двигателя.

Выражение (3) позволяет существенно упростить процесс настройки регуляторов при построении САУ, а также применить известные для ДПТ НВ методы регулирования скорости. Используя указанный подход, а также следуя принципу Понселе (регулирование по возмущению) путем ввода сигнала задания на управление АД, равный сумме заданий синхронной скорости  $\omega_1$  и скорости скольжения  $\Delta\omega$  (по сути, положительная обратная связь по колебательной составляющей момента), теоретически получаем полную компенсацию влияния момента нагрузки. Однако физической реализации данного факта не происходит. По этой причине поиск дополнительных способов реализации постоянства скорости остановлен на применении последовательно-параллельной коррекции. Данный принцип положительно себя зарекомендовал в системах управления ДПТ НВ. Учитывая сказанное выше, общее направление синтеза векторных асинхронных инвариантных систем заключается в построении САУ по аналогии двухзонного способа регулирования ДПТ, а именно канала стабилизации  $\Psi_{rx} = \text{const}$ , а также канала регулирования частоты

вращения ротора  $\omega$  АД. Регуляторы (скорости и потокосцепления ротора, а также в контурах регулирования токов) в таких системах целесообразнее настраивать на технический оптимум ввиду максимального быстродействия. Используя все рекомендации и принципы, описанные выше, можно получить стабилизацию скорости на уровне 2%, что обеспечивает требования к качеству формирования слитка.

### Повышение энергетических показателей

С началом производства биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) появились широкие возможности построения различных систем преобразования энергии. Одной из них стала разработка активных преобразователей. Критериями, по которым такие преобразователи можно выделить в отдельный класс, являются:

- полупроводниковые ключи (транзисторы) полностью управляемые, а именно, позволяющие в любой момент производить включение и соответственно выключение;
- коммутация искусственная или принудительная,
- способ управления — программная или следящая ШИМ.

Кроме того, активные преобразователи имеют уникальные свойства, предопределившие их перспективное использование в энергосберегающих электроприводах переменного тока:

- а) практически синусоидальный ток в режимах рекуперации и потребления энергии;
- б) возможность регулирования в широких пределах коэффициентов искажения и мощности.

Ввиду того, что выше описывалась система с частотно-токовым управлением и наиболее распространенной схемой построения векторных электроприводов является двухзонное преобразование энергии (выпрямитель — инвертор), то целесообразно привести пример использования векторной системы активного трехфазного мостового выпрямителя тока. При ее построении коэффициент мощности всего электропривода как элемента электроснабжения в синхронно вращающейся с вектором сетевого напряжения системе координат определяется по выражению [2]

$$\cos \varphi = \frac{i_x}{\sqrt{i_x^2 + i_y^2}}, \quad (4)$$

где  $i_x$  и  $i_y$  — соответственно проекция сетевого тока на оси  $X$  и  $Y$ .

Из выражения (4) видно, что преобразователь будет представлять активную нагрузку для сети в случае равенства  $i_y$  нулю. В этом случае коэффициент мощности будет равен 1. Следовательно, векторная САУ активным выпрямителем тока должна обеспечивать стабилизацию величины проекции сетевого тока на ось  $Y$  на нулевом

уровне. Исследования, приведенные в [2], доказывают правомерность такого способа регулирования и величина  $\cos\varphi$  находится в пределах 0,98–0,99.

**Синтез частотно-токового инвариантного асинхронного электропривода на основе активных преобразователей для МНЛЗ**

На основе использования принципов инвариантности и повышения энергетических показателей разработан электропривод, одновременно обеспечивающий инвариантность к колебательному моменту нагрузки и улучшающий показатели качества электропотребления. Структурная схема такого привода представлена на рис. 1.

Из рисунка видно, что весь разработанный электропривод можно разбить на три составные части:

- а) канал стабилизации потокосцепления ротора с задающей величиной  $\Psi_3$ ;
- б) канал стабилизации скорости вращения ротора АД с задающей величиной  $\omega_3$ ;
- в) канал регулирования коэффициента мощности, для которого входной величиной является величина  $e_n$ , т.е. текущая информация о режиме работы АД, а выходными – составляющие сетевых токов  $i_x, i_y$ .

Необходимо отметить, что в канал регулирования скорости ротора внесено изменение по сравнению с [1]. Вместо положительной обратной связи по колебательной составляющей момента нагрузки введена положительная обратная связь по полному моменту. Это, а также высокое быстродействие систем на IGBT транзисторах позволили снизить общую инерционность привода и улучшить стабилизацию скорости.

**Апробация результатов**

Для анализа результатов работы синтезированного электропривода было использовано численное моделирование по методу Эйлера. На рис. 2–5 представлены результаты использования такого электропривода осциллятора кристаллизатора МНЛЗ. Диаграмма изменения скорости вращения вала двигателя при использовании известной системы стабилизации, описанной в [1], представлена на рис. 2. Применение же разработанного электропривода дает

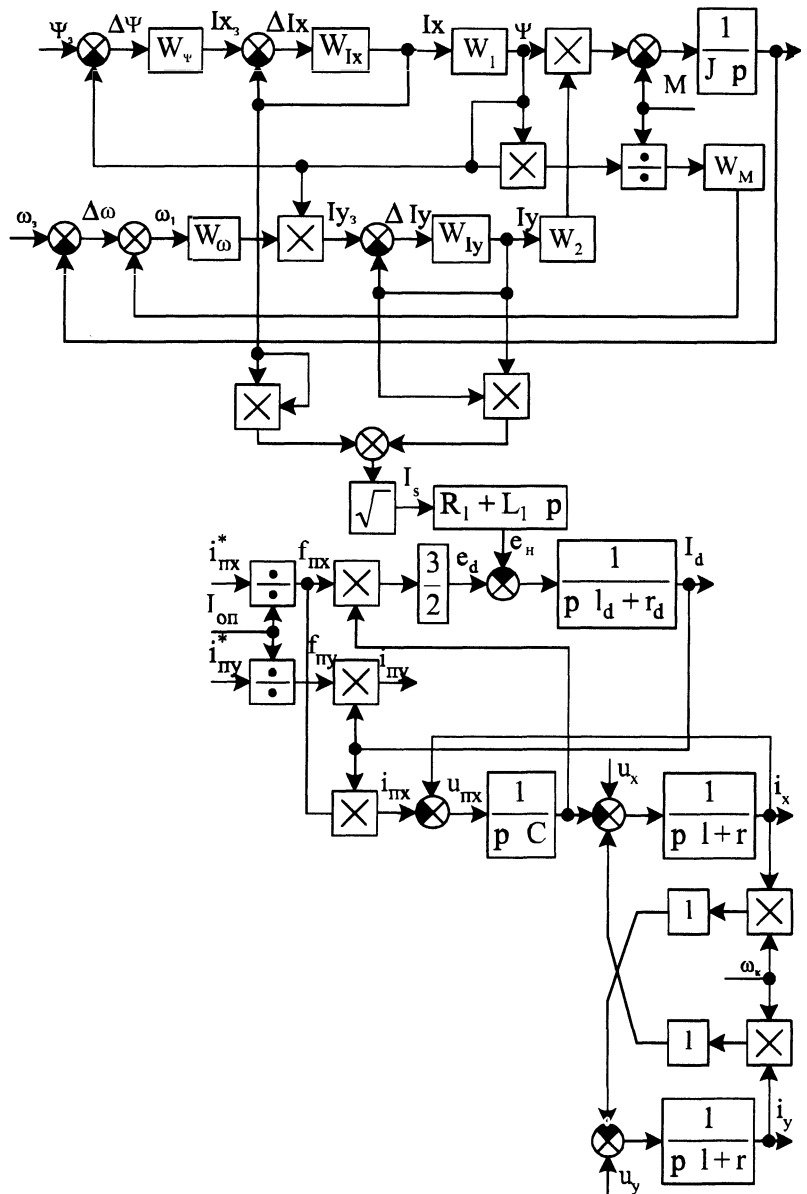


Рис. 1. Векторный асинхронный частотно-токовый электропривод, инвариантный к колебательному моменту нагрузки, на основе активного выпрямителя тока:  $\Psi_3$  – сигнал задания потокосцепления ротора;  $\Delta\Psi$  – сигнал рассогласования между сигналом задания и истинным значением величины потокосцепления ротора  $\Psi$ ;  $W_\Psi$  – регулятор потокосцепления ротора;  $I_{x3}$  – сигнал задания на составляющую тока статора, ориентированную на ось X;  $\Delta I_x$  – сигнал рассогласования между сигналом задания и истинным значением величины составляющей тока статора  $I_x$ , ориентированной по оси X;  $W_{I_x}$  – регулятор этой составляющей тока;  $W_1$  – передаточная функция перехода от  $I_x$  к  $\Psi$ ;  $J$  – приведенный к валу двигателя момент инерции механизма;  $p$  – оператор Лапласа;  $M$  – момент нагрузки;  $W_M$  – регулятор момента;  $\omega_3, \omega, \Delta\omega$  – соответственно сигнал задания, истинное значение и сигнал рассогласования скорости;  $\omega_1$  – скорость вращения поля статора;  $W_\omega$  – регулятор скорости;  $I_{y3}, \Delta I_y, I_y$  – соответственно сигнал задания, истинное значение и сигнал рассогласования составляющей тока статора, ориентированной по оси Y;  $W_{I_y}$  – регулятор указанной составляющей тока;  $W_2$  – переходная передаточная функция, необходимая для дальнейшего определения момента двигателя;  $I_s$  – модуль величины тока статора;  $R_s, L_s$  – активное сопротивление и индуктивность статорной обмотки;  $f_{nx}^*, f_{ny}^*$  – задающие воздействия на ток;  $f_{nx}, f_{ny}$  – составляющие коммутационной вектор-функции;  $I_{оп}$  – опорная величина тока;  $e_n$  – ЭДС нагрузки;  $e_d$  – выпрямленная ЭДС преобразователя;  $l_d, r_d$  – параметры дросселя;  $l, r$  – параметры сети (трансформатора);  $C$  – величина емкости фильтра в звене постоянного тока;  $i_d$  – выпрямленный ток;  $i_{nx}, i_{ny}$  – модули составляющих тока;  $i_x, i_y$  – составляющие сетевого тока;  $u_x, u_y$  – составляющие сетевого напряжения;  $\omega_x$  – частота сети

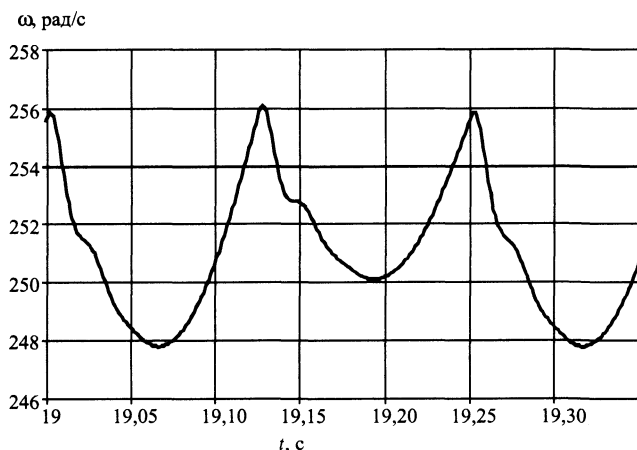


Рис. 2. Диаграмма изменения скорости вращения вала двигателя по системе [1]

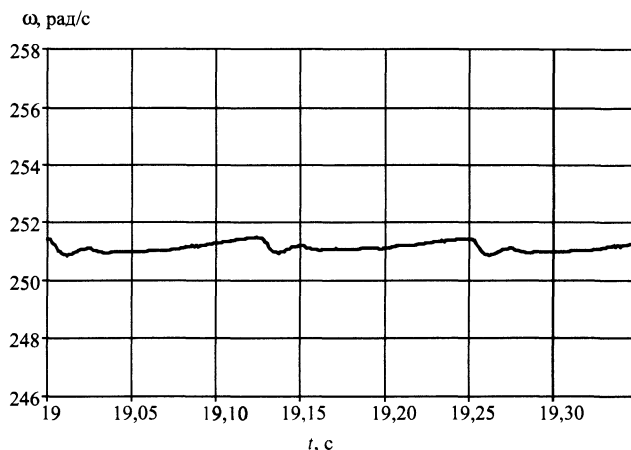


Рис. 3. Диаграмма изменения скорости вращения вала двигателя по предлагаемой системе

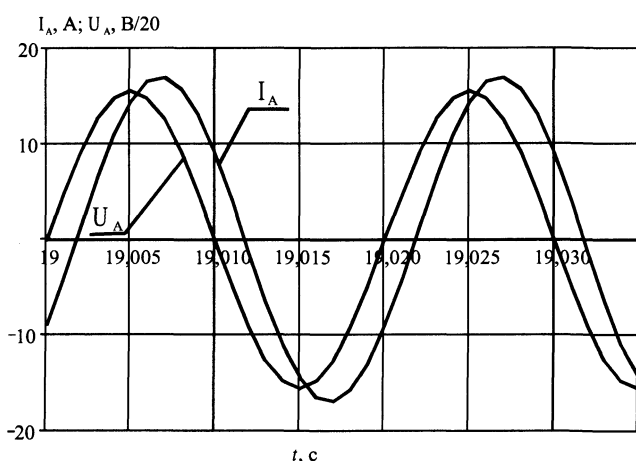


Рис. 4. Осциллограммы сетевого тока и напряжения фазы А по системе [1]

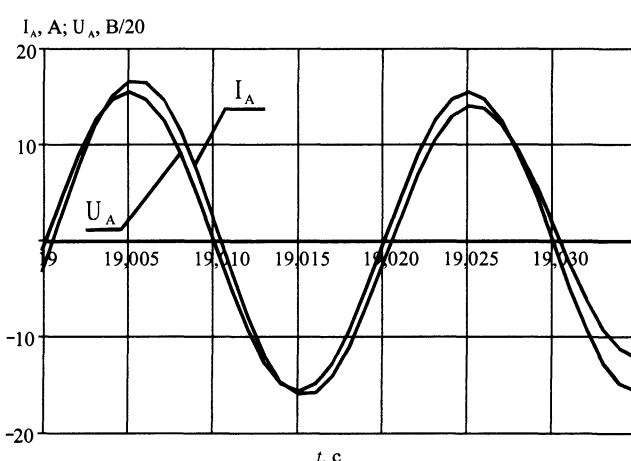


Рис. 5. Осциллограммы сетевого тока и напряжения фазы А по предлагаемой системе

диаграмму, приведенную на рис. 3. Осциллограммы сетевого тока и напряжения фазы А для системы [1] показаны на рис. 4, для предложенного привода – на рис. 5. В известной системе [1] (см. рис. 2) отклонение скорости от заданной (251,28 рад/с) составило 2%, коэффициент мощности (рис. 4) – 0,85. В предлагаемом электроприводе отклонение скорости от заданной составило 0,2% (см. рис. 3), коэффициент мощности – 0,98 (рис. 5).

Так как численный эксперимент проводился на непрерывной модели АВТ и АИТ, то показать реальную несинусоидальность токов не удалось, однако, как отмечено в работе [2], сетевые токи в этом случае очень близки к синусоидальной форме.

Итак, применение активных преобразователей энергии в векторных асинхронных электроприво-

дах, инвариантных к колебательному моменту нагрузки с целью обеспечения синусоидальности потребляемого сетевого тока и повышения коэффициента мощности, оказывается эффективным для МНЛЗ и других механизмов с колебательной нагрузкой, где необходимо соблюдать жесткую стабилизацию скорости, а также и в других энергосберегающих электроприводах.

### Литература

1. Логвин В.В., Рожков А.И. Система автоматического управления векторного электропривода, инвариантного к колебательному моменту нагрузки // Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого. Гомель, 2000.
2. Ефимов А.А., Шрейнер Р.Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока / Под общ. ред. Р.Т. Шрейнера. Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001.
3. Марголин Ш.М. Электропривод машин непрерывного литья заготовок. М.: Металлургия, 1987.