

Для розрахунку перехідного процесу відповідно з рівнянням (12) необхідно мати значення координат режиму у двох попередніх точках, що можна здійснити, використовуючи так званий природний кубічний сплайн на двоточковому шаблоні [1]. Для цього необхідно прийняти вектор коефіцієнтів  $\vec{c}_j$  таким, що дорівнює нулю. Внаслідок цього отримаємо рівняння

$$3\vec{y}_j - 2h_j\vec{z}_j = 3\vec{y}_{j-1} + h_j\vec{z}_{j-1}. \quad (15)$$

Сучасні ЕМП нерідко мають в обмотках вентиля, тому виникає потреба визначення моментів їх комутації. Як було наведено вище, вентиля можна замінити активними опорами, значення яких під час комутації вентилів змінюються стрибком. Якщо на  $j$ -му кроці інтегрування системи (3) встановлено, що струм вентиля  $k$ -го контуру змінює знак, то результат розрахунку на цьому кроці відкидається, і необхідно визначити момент переходу миттєвого значення струму вентиля через нуль. Для цього у рівняння (12) підставляють значення струму  $i_k$   $k$ -го контуру таким, що дорівнює нулю і визначають значення кроку  $h_j$ . Змінивши значення опору вентиля  $k$ -го контуру, продовжуємо інтегрування, починаючи розгін з формули (15), а потім переходимо до формули (12).

1. Алберг Дж., Нильсон Э., Уоли Дж. Теория сплайнов и ее приложения / Пер. с англ. М., 1972. 2. Деккер К., Вервер Я. Устойчивость методов Рунге-Кутты для жестких нелинейных дифференциальных уравнений / Пер. с англ. М., 1988. 3. Маляр В.С. Основные положения сплайн-метода расчета периодических режимов работы электрических цепей // Электроника и связь. 1998. Вып. С.11–14. 4. Фильц Р.В. Математические основы теории электромеханических преобразователей. К., 1979. 5. Фильц Р.В. Машинный алгоритм алгебраизации производных при расчетах переходных процессов в электроэнергетических системах неявными методами // Изв. вузов СССР. Энергетика. 1990. № 2. С.40–42. 6. Чуа Л.О., Лин Пен-Мин. Машинный анализ электронных схем / Пер. с англ. М., 1980. 7. Шегедин А.И., Социн Р.Я. Пакет программ для анализа вынужденных колебаний в электрической цепи // Электронное моделирование. 1982. № 2. С.42–45.

УДК 62-83:621.313.333

Малахов В.П., Петрушин В.С., Кельбас Д.Н., Рябинин С.В.  
Одесский государственный политехнический университет

## АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ PSPICE

© Малахов В.П., Петрушин В.С., Кельбас Д.Н., Рябинин С.В., 2000

При сумісному розгляді у математичній моделі частотного електропривода напівпровідникового перетворювача, двигуна та навантажувального механізму запропоновано використовувати аналогову модель перетворювача, отриману за

**допомогою програми моделювання PSPICE. Розглянуто зміни ККД та коефіцієнта потужності електропривода під час регулювання. Результати теоретичного аналізу підтверджені експериментально.**

Применение регулируемого асинхронного электропривода дает возможность осуществить комплексную механизацию и автоматизацию, совершенствовать технологические процессы во многих отраслях народного хозяйства.

Исследование работы асинхронного частотного электропривода можно осуществлять с помощью математической модели, состоящей из моделей полупроводникового преобразователя, двигателя и нагрузочного механизма. Математическая модель асинхронного короткозамкнутого двигателя (АД) рассмотрена в [1]. Модель преобразователя в первую очередь должна обеспечить определение гармонических составляющих напряжения, подаваемого на двигатель, которые при регулировании меняются по значению и частоте в соответствии с выбранным законом частотного управления. При амплитудном регулировании в преобразователе частоты с автономным инвертором напряжения форма выходного напряжения преобразователя  $U_1$  прямоугольная, что позволяет в его математической модели использовать известные аналитические выражения для расчета гармонических составляющих

$$U_1 = U_{m1} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + \sum^v U_{mv} \sin(v\omega t + \varphi_v),$$

$$U_{mv} = \frac{3\sqrt{2}U_u}{v\pi},$$

где  $U_u$  – напряжение на выходе управляемого выпрямителя,  $v$  – номер гармоники.

Полученные значения гармоник подаются на схемно-математическую модель регулируемого короткозамкнутого двигателя, основанную на представлении реальной электрической машины в виде совокупности условных двигателей, питаемых этими гармониками, с переменными параметрами их схем замещения. Определение параметров выполняется с учетом насыщения магнитопровода и вытеснения тока в проводниках в различных нагрузочно-регулируемых точках. После расчета магнитных, электрических, механических величин условных двигателей с помощью известного метода суперпозиции осуществляется переход к реальному асинхронному двигателю. Для реального двигателя возможно определение также энергетических и тепловых показателей для каждой нагрузочно-регулируемой точки, число которых определяется задаваемыми параметрами регулирования и выбранным диапазоном вычислений.

Представляется целесообразным для реализации аналоговых моделей преобразователей использовать компьютерные программы моделирования электронных схем. Для выполнения аналогового математического моделирования был выбран пакет фирмы MicroSim DesignLab 8.1. Аргументы при выборе были такие:

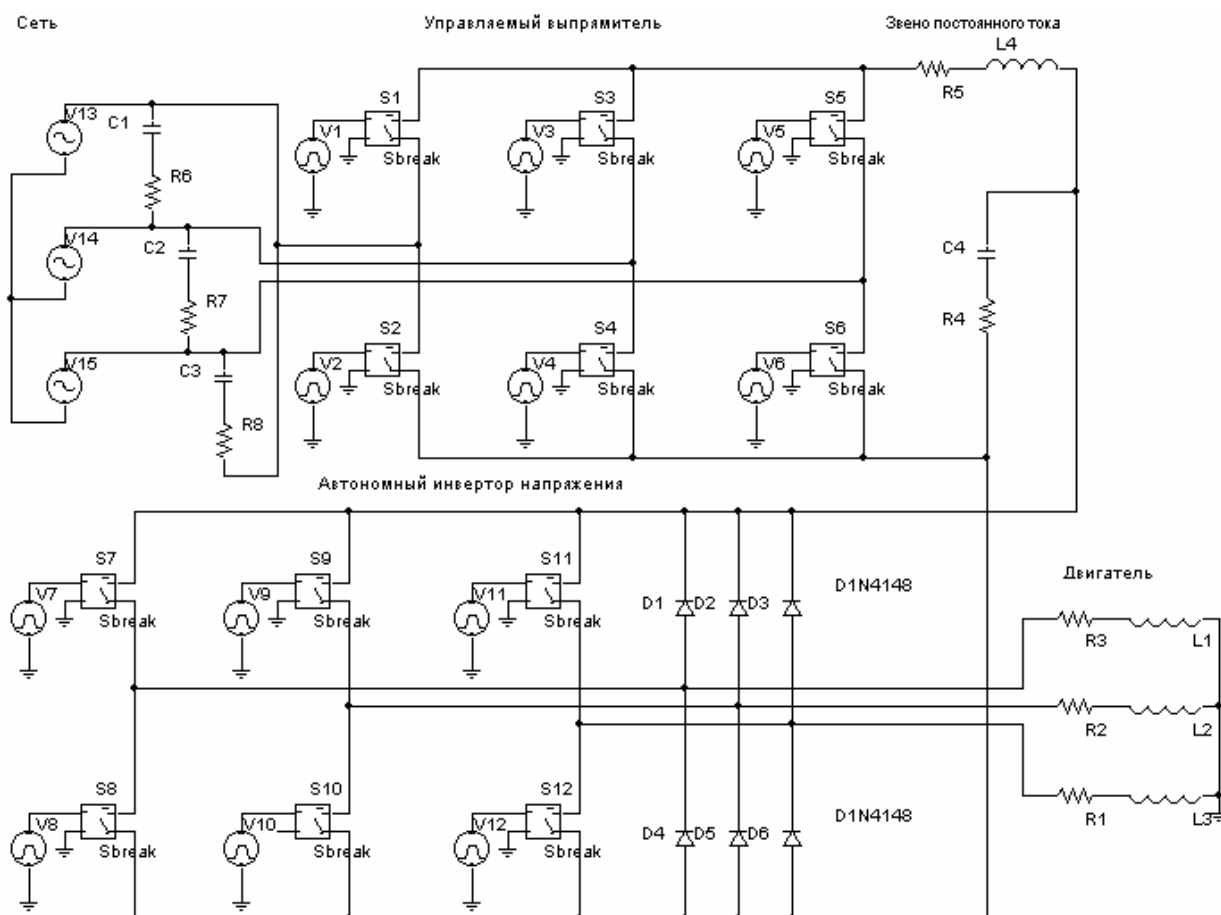
- мощное и надёжное вычислительное ядро, проверенное временем и реконструированное фирмой для 32-разрядных процессоров;

- более 10 тысяч библиотечных моделей компонентов информационной и силовой электроники ведущих фирм производителей;

– возможность получить модель полупроводникового преобразователя в текстовом представлении, совместимую с более простыми программами моделирования, а также возможность получения результатов расчёта в виде текстового файла для упрощения межпрограммного интерфейса;

– удобный графический интерфейс пользователя.

Модель полупроводникового частотного преобразователя представлена на рис.1.



**Рис.1.** Аналоговая модель частотного преобразователя.

Модель включает в себя управляемый тиристорный выпрямитель с фильтрующими цепями на входе, интегрирующее звено постоянного тока, автономный инвертор напряжения (АИН) и эквивалентную LR-модель двигателя. Эквивалентные индуктивное и активное сопротивления двигателя, угол отпирания тиристоров выпрямителя определяются для каждой расчётной точки.

Допущениями, принятыми при использовании аналитической модели, являются жесткость внешней характеристики управляемого выпрямителя и независимость напряжения на его выходе от параметров интегрирующего звена постоянного тока. Эти допущения исключаются при использовании аналоговой модели. Поэтому включение предложенной аналоговой модели преобразователя в математическую модель электропривода дает возможность улучшить адекватность модели и позволит на основе анализа работы совершенст-

вывать отдельные элементы (выпрямитель, инвертор, асинхронный двигатель). Кроме того возможно рассмотрение вопросов электромагнитной совместимости электропривода с питающей сетью, которые уже давно исследуют. Наличие в преобразователях силовых ключей является причиной несинусоидальности формы тока, потребляемого приводом, и, наряду с этим, искажений формы напряжения в сети соизмеримой мощности. В анализируемом преобразователе частоты регулирования выходного напряжения выпрямителя изменением момента отпирания и запираания ключей обуславливает отставание потребляемого приводом тока от напряжения сети, что является причиной появления и изменения уровня потребляемой реактивной мощности и приводит к отклонениям и колебаниям напряжения сети. Таким образом, частотный электропривод может негативно воздействовать на устойчивость работы систем питания и автоматического регулирования, средств связи, работу контрольно-измерительной аппаратуры и ответственных потребителей электроэнергии, вызывает дополнительные убытки.

Для проведения теоретических исследований на основе описанной математической модели асинхронного частотного электропривода был разработан программный пакет. В связи с необходимостью аналогового моделирования полупроводникового преобразователя отработано включение в этот пакет программы моделирования электронных схем PSPICE.

Одними из наиболее важных показателей работы рассматриваемого электропривода являются энергетические. При использовании аналитической модели преобразователя их значения можно определить весьма приблизительно. Если известен усредненный коэффициент полезного действия частотного преобразователя  $\eta_{упр}$ , то активная мощность  $P_{пр}$ , потребляемая приводом, рассчитывается в зависимости от мощности  $P_1$ , потребляемой двигателем, и этого коэффициента

$$P_{пр} = \frac{P_1}{\eta_{упр}}.$$

Используя полученные значения и значения мощности на валу двигателя  $P_2$  можно определить значения КПД электропривода для разных точек диапазона регулирования. Значения коэффициентов мощности электропривода  $\chi_{пр}$  приближенно можно приравнять к значениям косинусов углов открытия управляемого выпрямителя  $\alpha$ , которые изменяются при регулировании,  $\chi_{пр} = \cos \alpha$ .

Аналоговая модель, полученная с помощью программы моделирования PSPICE, даст возможность получить в любой точке регулирования гармонический состав потребляемого приводом тока  $I_{пр}$ , а также угол сдвига между напряжением сети и током основной гармоники  $\varphi_1$ . Используя эти значения, определяют действующие значения токов

$$I_{пр} = \sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2}, \text{ коэффициенты искажения токов } Ki_{пр} = \frac{I_1}{I_{пр}}, \text{ и, согласно [2],}$$

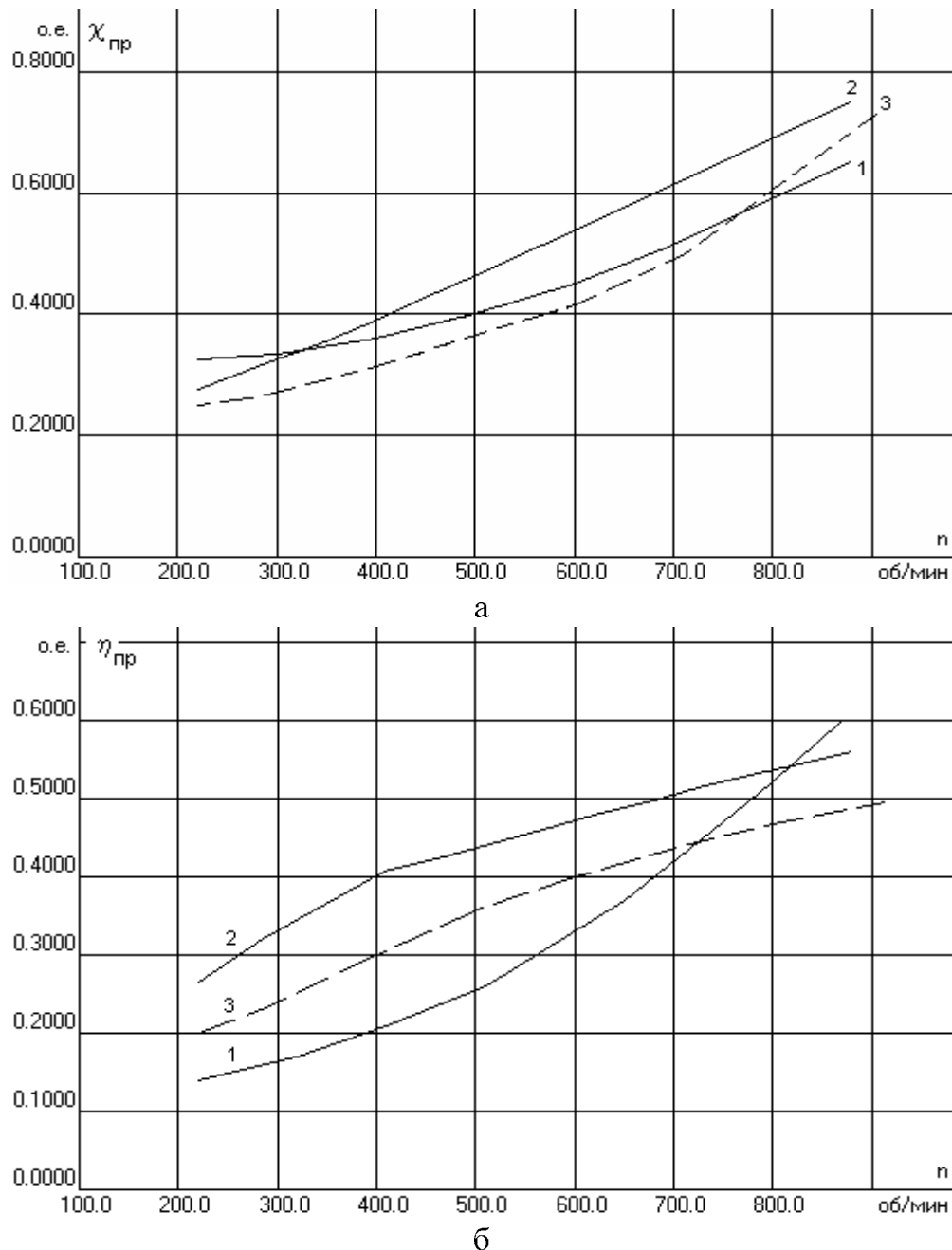
коэффициенты мощности привода  $\chi_{пр} = \cos \varphi Ki_{пр}$ . Активная мощность, потребляемая преобразователем, определяется как  $P_{пр} = 3UI_{пр}\chi_{пр}$ , что дает возможность рассчитать КПД

$$\text{привода } \eta_{пр} = \frac{P_2}{P_{пр}}.$$

Теоретические и экспериментальные исследования были выполнены для системы частотного привода с автономным инвертором напряжения, мостовыми схемами управля-

емых выпрямителя и инвертора, амплитудным регулированием и законом частотного управления  $U/f=\text{const}$ . Исследуемый привод включает в себя отечественный преобразователь ТПТР–10–400 и серийный асинхронный двигатель 4АХ80А6У3. В качестве нагрузки на валу выбрана нагрузка с постоянным во всем диапазоне регулирования нагрузочным моментом 5 Нм. Расчетные характеристики получены с помощью аналитической и аналоговой моделей преобразователя.

На рис.2,а,б приведены зависимости изменения энергетических показателей привода  $\eta_{\text{пр}}$  и  $\chi_{\text{пр}}$  в рассматриваемом диапазоне регулирования.



**Рис.2.** Изменение энергетических показателей привода в диапазоне регулирования (а, б):

- 1 – полученные с помощью аналоговой модели;
- 2 – полученные с помощью аналитической модели;
- 3 – экспериментальные.

Сопоставление характеристик, полученных расчетным путем и экспериментальными исследованиями показывает, что использование аналоговой модели дает возможность снизить погрешность определения рассматриваемых величин по сравнению с аналитической моделью.

Аналогично, используя аналоговые модели, составленные с помощью программы моделирования PSPICE, можно выполнить анализ работы частотных приводов и асинхронных двигателей этих приводов при других типах частотных преобразователей, силовых схемах, видах регулирования, законах частотного управления, различных величинах и характерах нагрузки.

1. Лысенко С.И., Петрушин В.С., Слободниченко Б.И. Математическая модель асинхронного короткозамкнутого двигателя при частотном регулировании // *Технічна електродинаміка: Спец. вип.* 1998. С.31–35. 2. Петрушин В.С. Коэффициент мощности электрических нагрузок в автономных деформированных системах // *Изв. вузов. Энергетика.* 1990. Вып.4. С.68-72.

УДК 621.365

**Марущак Я.Ю., Кравцов В.**

ДУ “Львівська політехніка”, кафедра ЕАП

## **ДОСЛІДЖЕННЯ САР ОДНОМАСОВОЇ СИСТЕМИ, СИНТЕЗОВАНОЇ МЕТОДОМ УЗАГАЛЬНЕНОГО ХАРАКТЕРИСТИЧНОГО ПОЛІНОМА**

© Марущак Я.Ю., Кравцов В., 2000

**Проаналізовано вплив внутрішнього зворотного зв'язку за ЕРС на динамічні характеристики СПР одномасової системи, синтезованої методом узагальненого характеристичного полінома. Отримано вирази передавальних функцій регуляторів струму та швидкості при будь-яких співвідношеннях постійних часу електропривода.**

Сучасні електромеханічні системи постійного струму широко застосовують в різноманітних виробничих механізмах та пристроях. Більшість із них побудовані за принципом підпорядкованого регулювання, запропонованого Кеслером [1]. Завдяки наявності регуляторів для кожної координати регулювання в таких системах є можливість обмеження проміжних координат, а також уніфікації синтезу та налаштування кожного контуру регулювання. На сьогодні відомими є два критерії синтезу регуляторів: технічний і симетричний, які забезпечують відповідні форми перехідних функцій координат регулювання.

Під час синтезу традиційних систем підпорядкованого регулювання (СПР) встановлюються постійні часу, які повинен компенсувати регулятор цього контуру. Крім цього,