

УДК 62-83.001.24

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТУРОВ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ШНЕКА ЗАГРУЗКИ ПЛАМЕННОГО РЕАКТОРА

Дементьев Ю.Н., Власов А.И., Кояин Н.В., Умурзакова А.Д.

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск,
e-mail: dementev@tpu.ru, revvio@gmail.com*

В статье проведено исследование частотно-управляемого асинхронного электропривода для шнека загрузки с целью получения желаемых динамических характеристик электропривода при известных параметрах объекта регулирования. Проведены исследования на имитационных моделях основных контуров регулирования, оптимизация контуров регулирования и представлены динамические показатели качества регулирования. Полученные результаты подтверждают возможность применения частотно-регулируемого асинхронного электропривода для шнека загрузки пламенного реактора. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод позволяет обеспечить динамические показатели качества регулирования, сравнимые с электроприводом постоянного на базе двигателя с независимым возбуждением, а анализ динамических показателей качества регулирования основных контуров системы частотно-регулируемого асинхронного электропривода, полученных в результате моделирования и ожидаемых, показывает, что они практически не отличаются друг от друга и качество переходных процессов в контуре скорости с фильтром на входе несколько лучше, чем без него.

Ключевые слова: оптимизация, асинхронный электродвигатель, электропривод, частотное управление

CONTROL LOOPS OPTIMIZATION OF THE VARIABLE FREQUENCY ELECTRIC DRIVE OF THE FLAME REACTOR FEEDING SCREW

Dementev Yu.N., Vlasov A.I., Koyain N.V., Umurzakova A.D.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: dementev@tpu.ru, revvio@gmail.com

The paper presents the optimization of control loops of the variable frequency electric drive for feeding screw in order to obtain desired dynamic characteristics of the drive with the known parameters of the regulation object. Simulation studies of basic control loops and their optimization have been carried out and dynamic control quality indicators have been obtained. These results confirm the applicability of the variable frequency electric drive for the flame reactor feeding screw. Variable frequency electric drive provides dynamic control quality indicators that are comparable with ones of the dc motor drive and analysis of dynamic indicators of the quality control system of the main loops of variable frequency induction motor drive, derived from the simulations and expected ones, shows that they practically coincide with each other and the quality of transients in the speed loop with input filter is slightly better than without it.

Keywords: optimization, induction motor, asynchronous electric drive, frequency control

Технологический процесс фторирования урана требует точного дозирования оксида урана, надёжности и безопасности электропривода шнека загрузки.

В настоящее время в качестве электропривода (ЭП) шнека загрузки, служащего для подачи в пламенный реактор оксида урана в виде мелкокристаллического вещества при фторировании урана, используется ЭП постоянного тока, недостатками которого является низкая надёжность машины постоянного тока из-за наличия щёточно-коллекторного узла, сложность в обслуживании, высокая стоимость эксплуатации и массогабаритные показатели [4]. Использование ЭП на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АД) и реализация современных методов управления им даёт высокие показатели эффективности и работоспособности таких электроприводов [5]. Широкое использование АД в массовом и специализированном электроприводе можно объяснить его высокой надёжностью, обусловленной отсутствием щеточно-коллекторного узла и постоянных магнитов, простотой конструкции, малыми

габаритами и моментом инерции ротора, отсутствием коммутационных ограничений по скорости и току и т.д. [1].

Поэтому разработка, исследование и внедрение современного частотно-регулируемого асинхронного ЭП для шнека загрузки пламенного реактора является актуальной и соответствует требованиям времени.

Оптимизация контуров регулирования системы частотно-управляемого асинхронного электропривода

Характерной особенностью частотно-регулируемых ЭП переменного тока является относительно большая инерционность в цепи обратной связи контуров регулирования тока, потокосцепления и скорости [3]. Поэтому для их оптимизации не может быть применена классическая теория оптимизации систем подчиненного регулирования с безынерционной обратной связью. Для оптимизации контуров регулирования с инерционной обратной связью используем методы, изложенные в [2]. Упрощенная структурная схема системы частотно-управляемого асинхронного ЭП приведена на рис. 1.

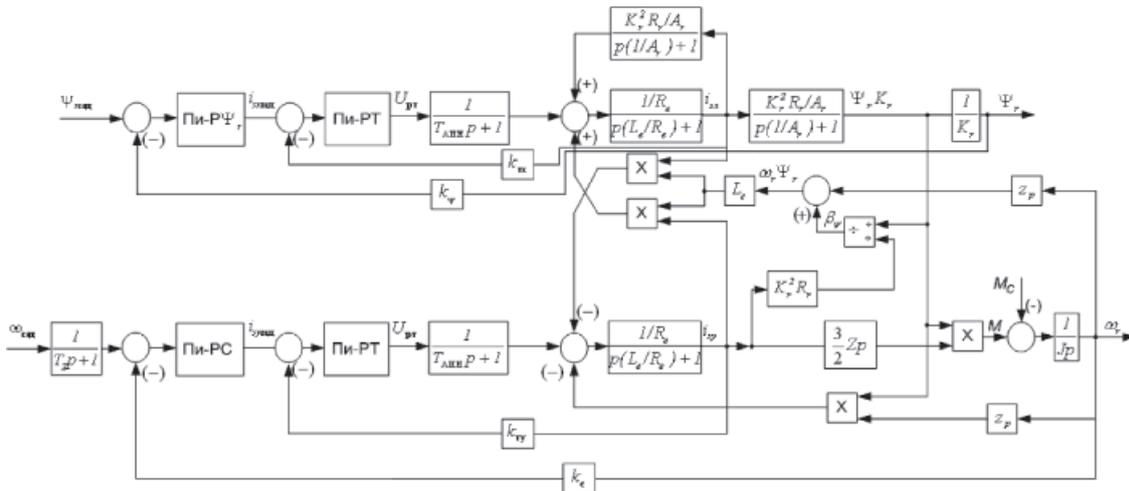


Рис. 1. Упрощенная структурная схема системы частотно-векторного управления асинхронным двигателем

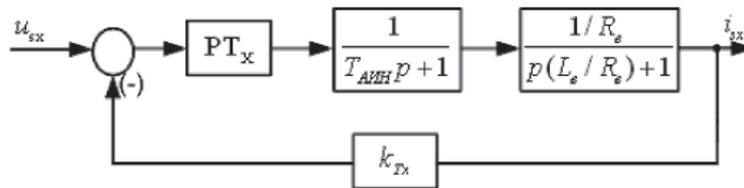


Рис. 2. Структурная схема контура для управления составляющей тока статора i_{sx}

Из структурной схемы видно, что в системе имеются контуры регулирования составляющей тока статора по оси x (с регулятором ПТ_x), составляющей тока статора по оси y (с регулятором ПТ_y), контур регулирования скорости двигателя (с регулятором РС) и контур регулирования, определяющий магнитный поток обмотки ротора машины (с регулятором РΨ).

Оптимизация контура тока

Оптимизацию контура тока осуществляем без учёта перекрёстных связей двигателя и при нулевых заданиях на скорость и поток. Структурная схема контура приведена на рис. 2.

С учётом параметров контура выбираем пропорционально-интегральный (ПИ) – регулятор с передаточной функцией

$$W_{PI}(p) = k_{PI} \cdot \frac{T_{PI} \cdot p + 1}{T_{PI} \cdot p},$$

где $T_{pm} = T_e = T_{reg}$ – постоянная времени регулятора; $k_{PI} = k_{reg} = \frac{T_e \cdot R_e}{a_r \cdot T_{inv} \cdot k_{inv}}$ – коэффициент усиления регулятора; k_{inv} – коэффициент обратной связи по току; a_m – коэффициент оптимизации контура тока по модульному оптимуму (МО).

Передаточная функция разомкнутого контура тока

$$W_{раз}(p) = \frac{1}{a_r \cdot T_{\mu r} \cdot p \cdot (T_{\mu r} \cdot p + 1)} \quad (1)$$

Передаточная функция замкнутого контура тока

$$W_{зам}(p) = \frac{1/k_r}{a_r \cdot T_{\mu r} \cdot p \cdot (T_{\mu r} \cdot p + 1) + 1} \quad (2)$$

При моделировании в качестве АД используется двигатель D09SA4 со следующими каталожными данными: синхронная скорость вращения $n_0 = 1500$ об/мин, номинальное фазное напряжение $U = 220$ В, номинальная мощность двигателя $P = 1,1$ кВт, номинальное скольжение $S = 0,067$, коэффициент полезного действия в режиме номинальной мощности $\eta_n = 76,3\%$, коэффициент мощности в режиме номинальной мощности $\cos \varphi_n = 0,78$, кратность максимального момента $\frac{M_k}{M_n} = k_{max} = 2,7$, кратность пускового момента $\frac{M_n}{M_n} = k_n = 2,3$, кратность минимального момента $\frac{M_{min}}{M_n} = k_{min} = 2,1$, кратность пускового тока $\frac{I_n}{I_n} = k_i = 5,1$.

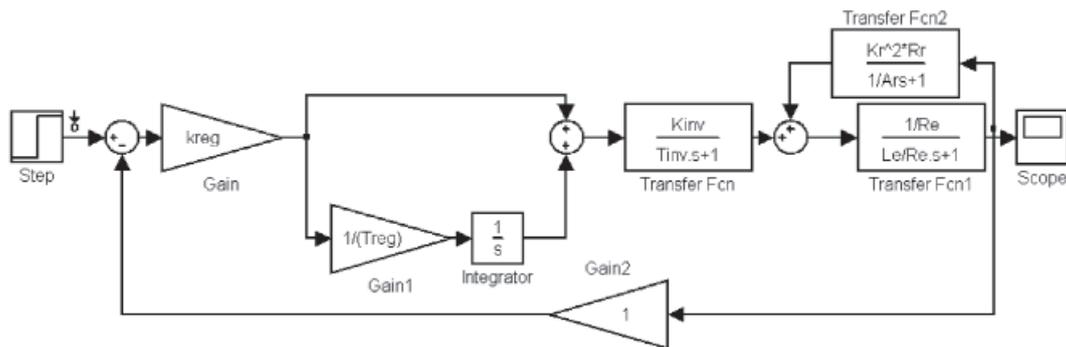


Рис. 3. Имитационная модель контура тока для управления составляющей тока статора i_{sx}

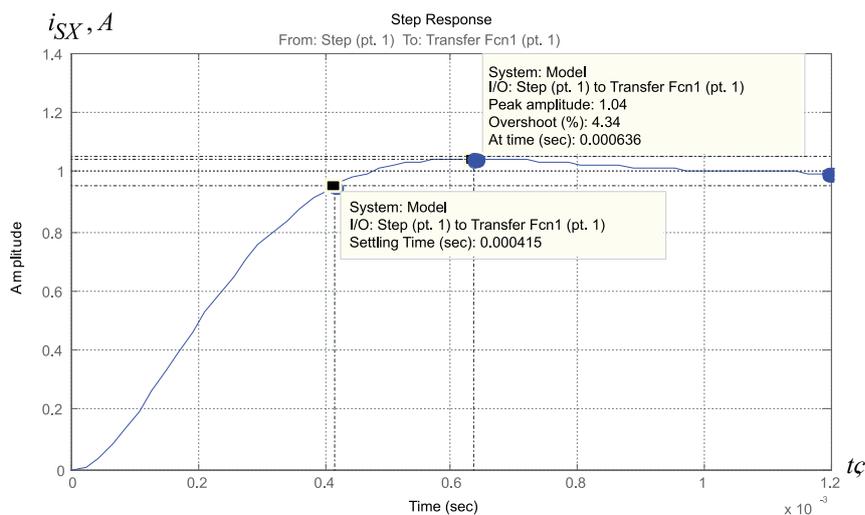


Рис. 4. Переходная характеристика $i(t)$ контура тока

Таблица 1

Динамические показатели качества регулирования контура тока

Показатели	Ожидаемые	Полученные
$\sigma, \%$	4,32	4,34
$t_{py1}^{(s)} = t_{py2}^{(s)}, \text{ о.е.}$	0,00041	0,000415
$\omega_n^{(m)} = \omega_n^{(\phi)}, \text{ о.е.}$	7100	7120



Рис. 5. Структурная схема контура потокосцепления

Результаты моделирования переходных процессов в контуре тока, настроенного на модульный оптимум при обработке ступенчатого входного воздействия $U_{3M} U_{3M} = 1 \text{ о.е.}$, представлены в виде переходной характеристики $i(t)$ на рис. 4.

Показатели качества работы контура тока сведены в табл. 1.

Анализ полученных результатов моделирования показывает, что настройка контура тока с ПИ-регулятором близка к настройке на МО системы 2-го порядка.

Контур является астатической системой 1-го порядка по управлению.

Оптимизация контура потокосцепления

Структурная схема контура потокосцепления приведена на рис. 5.

С учетом параметров контура выбираем ПИ-регулятор с передаточной функцией

$$W_{pp}(p) = k_{pp} \cdot \frac{T_{pn} \cdot p + 1}{T_{pp} \cdot p}, \quad (3)$$

где k_{pp} – коэффициент усиления; $T_{pp} = 1/A_R$ – постоянная времени регулятора.

Полная передаточная функция разомкнутого контура потокосцепления

По структурной схеме контура потокосцепления (рис. 5) составим имитационную модель, которая приведена на рис. 6.

Результаты моделирования переходных процессов в контуре потокосцепления, настроенного на МО, при отработке ступенчатого входного воздействия $U_{3п. макс} = 1$ В приведены в виде переходной характеристики $\Psi_r(t)$ на рис. 7.

Показатели качества работы замкнутого контура потокосцепления приведены в табл. 2.

$$W_{pp,раз}(p) = \frac{1}{a_{пн} \cdot a_{т} \cdot T_{ит} \cdot p \cdot (a_{т} \cdot T_{ит} \cdot p \cdot (T_{ит} \cdot p + 1) + 1)} \quad (4)$$

Полная передаточная функция замкнутого контура потокосцепления

$$W_{pc,зам}(p) = \frac{1/k_{пн}}{a_{пн} \cdot a_{т} \cdot T_{ит} \cdot p \cdot (a_{т} \cdot T_{ит} \cdot p \cdot (T_{ит} \cdot p + 1) + 1) + 1} \quad (5)$$

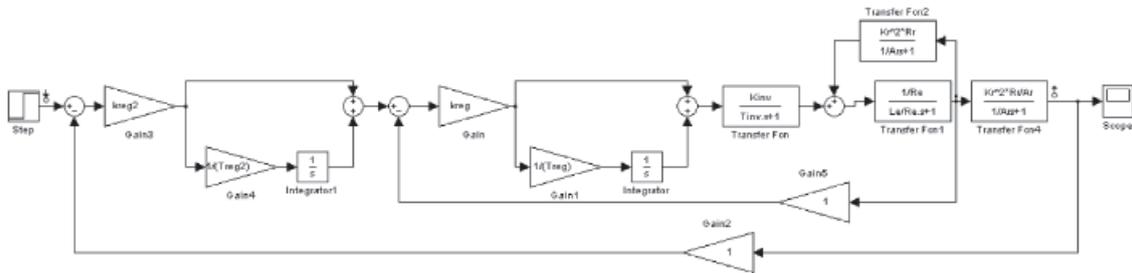


Рис. 6. Имитационная модель контура потокосцепления

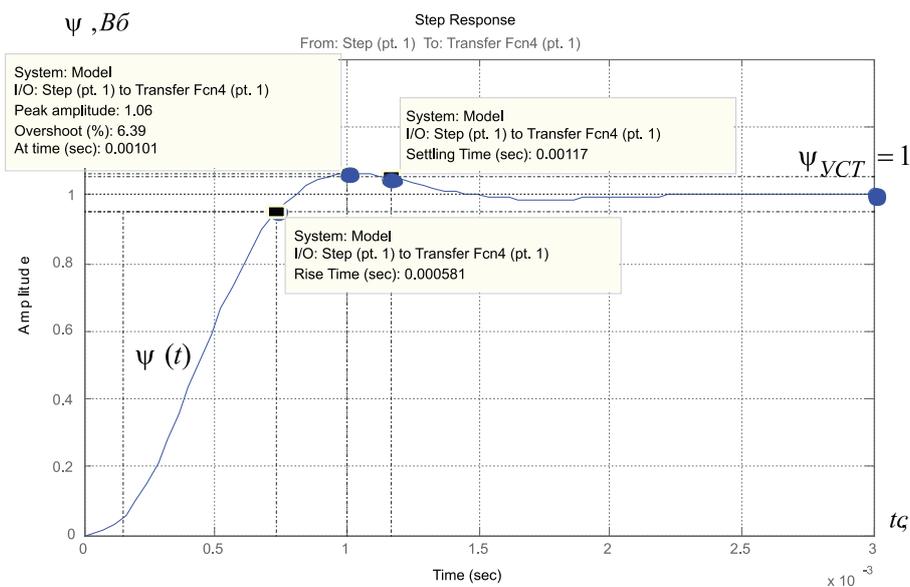


Рис. 7. Переходная характеристика контура потокосцепления

Таблица 2
Динамические показатели качества регулирования замкнутого контура потокосцепления

Показатели	Ожидаемые	Полученные
σ	8,14	6,39
$t_{py1}^{(s)}$, о.е.	0,0007	0,000581
$t_{py2}^{(s)}$, о.е.	0,0012	0,00117
$\omega_n^{(m)}$, о.е.	5000	4640
$\omega_n^{(\phi)}$, о.е.	3500	3440

Анализ полученных результатов моделирования контура потокосцепления показывает, что они практически совпадают с ожида-

емыми качественными показателями работы контура тока. Небольшие расхождения в величинах качественных показателей контура потокосцепления и тока находятся в пределах допустимой погрешности.

Оптимизация контура скорости

Структурная схема контура скорости приведена на рис. 8.

С учётом параметров контура выбираем ПИ-регулятор с передаточной функцией

$$W_{pc}(p) = k_{pc} \cdot \frac{T_{pc} \cdot p + 1}{T_{pc} \cdot p}, \quad (6)$$

где k_{pc} – коэффициент усиления; a_c – коэффициент оптимизации контура скорости на СО; $T_{mc} = a_t \cdot T_{mт}$ (о.е.) – малая постоянная времени контура; $T_2 = T_{pc}$ (о.е.) – большая постоянная времени контура.

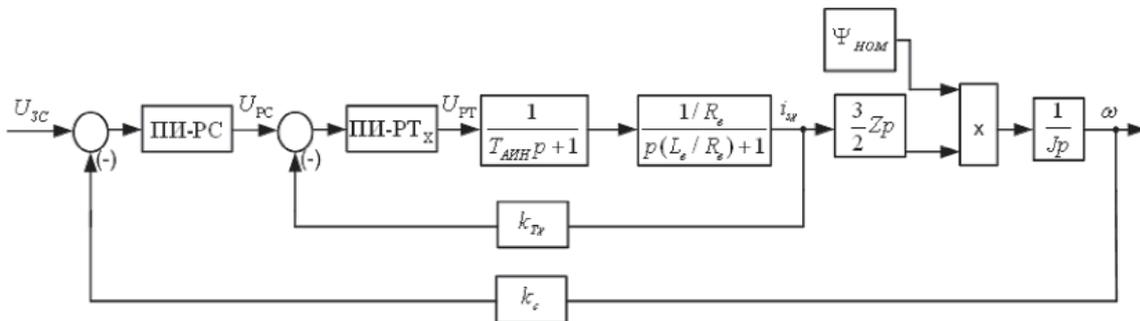


Рис. 8. Структурная схема контура скорости, настроенного на симметричный оптимум

Передаточная функция разомкнутого контура скорости, настроенного на СО:

$$W_{pc,раз}(p) = \frac{b_c \cdot a_c \cdot a_t \cdot T_{мт} \cdot p + 1}{b_c \cdot a_c \cdot a_t \cdot T_{мт} \cdot p \cdot (a_c \cdot a_t \cdot T_{мт} \cdot p (a_t \cdot T_{мт} \cdot p \cdot (T_{мт} \cdot p + 1) + 1))}$$

Передаточная функция замкнутого контура скорости без фильтра на входе:

$$W_{pc,зам}^{\phi}(p) = \frac{(b_c \cdot a_c \cdot a_t \cdot T_{мт} \cdot p + 1)}{b_c \cdot a_c \cdot a_t \cdot T_{мт} \cdot p \cdot (a_c \cdot a_t \cdot T_{мт} \cdot p (a_t \cdot T_{мт} \cdot p \cdot (T_{мт} \cdot p + 1) + 1) + 1)}$$

Передаточная функция замкнутого контура скорости с фильтром на входе:

$$W_{pc,зам}^{cf}(p) = \frac{1}{b_c \cdot a_c \cdot a_t \cdot T_{мт} \cdot p \cdot (a_c \cdot a_t \cdot T_{мт} \cdot p (a_t \cdot T_{мт} \cdot p \cdot (T_{мт} \cdot p + 1) + 1) + 1)}$$

По структурной схеме контура скорости, настроенного на СО (рис. 8), построена имитационная модель, представленная на рис. 9.

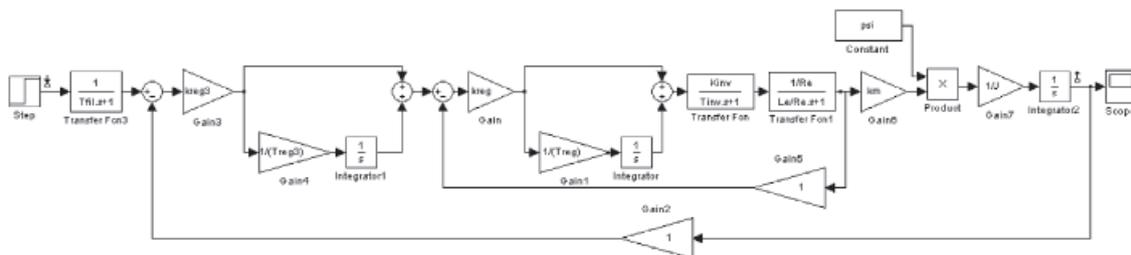


Рис. 9. Имитационная модель контура скорости, настроенного на СО

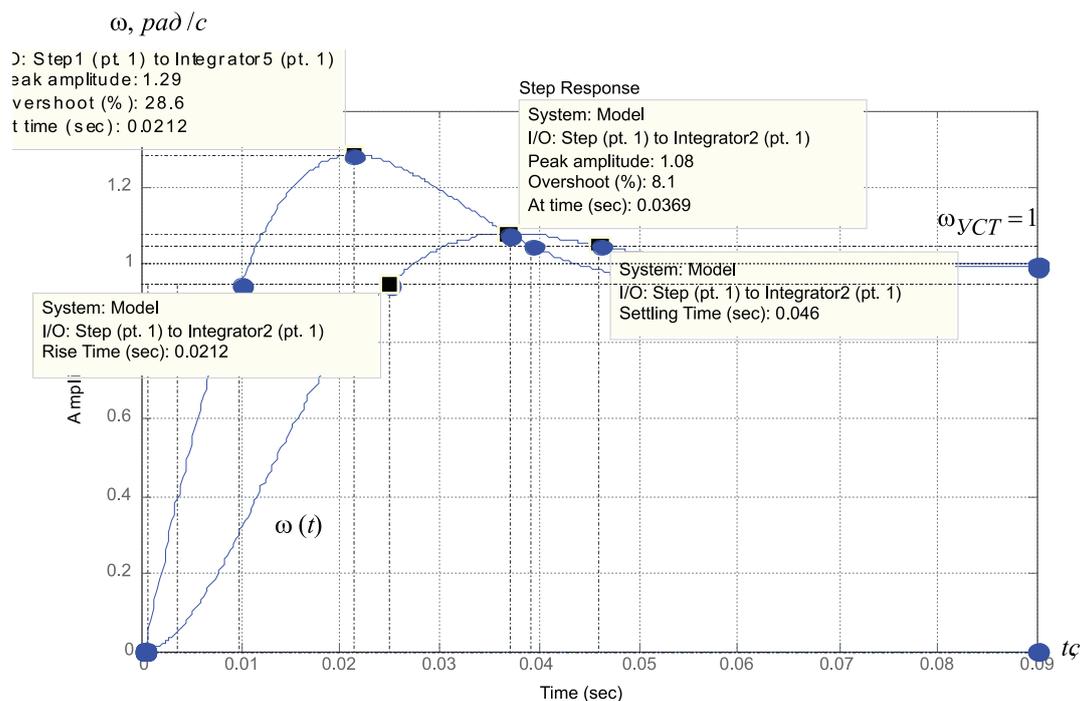


Рис. 10. Переходные характеристики $v(t)$ контура скорости, настроенного на СО

Таблица 3

Динамические показатели качества регулирования замкнутого контура скорости с фильтром на входе

Показатели	Ожидаемые	Полученные
$\sigma, \%$	8,1	8,1
$t_{py1}^{(s)}, \text{о.е.}$	0,02176	0,0212
$t_{py2}^{(s)}, \text{о.е.}$	0,03248	0,046
$\omega_n^{(M)}, \text{о.е.}$	141,24	124
$\omega_n^{(\Phi)}, \text{о.е.}$	101,69	103

Результаты моделирования переходных процессов в контуре скорости, настроенного на симметричный оптимум (с фильтром и без фильтра на входе), при обработке ступенчатого входного воздействия

$U_{зс.макс} = 1 \text{ В}$ приведены в виде переходных характеристик $v(t)$ на рис. 10.

Динамические показатели качества регулирования замкнутого контура скорости с фильтром на входе приведены в табл. 3.

Выводы

1. Установлено, что применение частотно-регулируемого асинхронного электропривода для шнека загрузки пламенного реактора позволяет обеспечить динамические показатели качества регулирования, сравнимые с электроприводом постоянного на базе двигателя с независимым возбуждением.

2. Анализ динамических показателей качества регулирования основных контуров системы частотно-регулируемого асинхронного электропривода, полученных в результате моделирования и ожидаемых, показывает, что они практически не отличаются друг от друга. Небольшая погрешность между ними связана с введением упрощений в расчетах при оптимизации контуров. Следует отметить, что качество переходных процессов в контуре скорости с фильтром на входе несколько лучше, чем без него.

Список литературы

1. Панкратов В.В., Зима Е.А. Энергооптимальное векторное управление асинхронными электроприводами. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – 120 с.
2. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Теория оптимизации непрерывных многоконтурных систем управления электроприводов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 164 с.
3. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
4. Demytyev Yu.N., Bragin A.D., Koyain N.V., Udut L.S. Control system with sinusoidal PWM three-phase inverter with a frequency scalar control of induction motor // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): proceedings, Omsk, May 21–23, 2015. – Новосибирск: IEEE Russia Siberia Section, 2015 – P. 1–6.
5. Demytyev Y.N., Umurzakova A.D. The engine mechanical coordinates measuring in the asynchronous motor // MATEC Web of Conferences 19, 010027 (2014) DOI: 10.1051/mateconf/20141901027. – URL: <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/20141901027>.