

УДК 621.313

**Косенко В. А., Квашнин В. О.****СРАВНЕНИЕ И АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ПРЯМОГО УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПИ- И ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ**

Развитие средств вычислительной техники и силовой электроники в последние десятилетия привело к тому, что появились новые возможности управления асинхронного двигателя (АД). В дополнение к модульному и трансекторному способам был разработан и с середины 90-х годов реализован способ так называемого прямого управления моментом (DTC – direct torque control) [1]. Однако использование в системе релейных регуляторов вызвало рост коммутационных потерь, что привело к повышенным пульсациям электромагнитного момента. В работе было рассмотрена ранее разработанная система с прямым управлением моментом АД на основе ШИМ (широтно-импульсная модуляция) [2], что в свою очередь позволило значительно снизить пульсации электромагнитного момента.

Целью работы являлось сравнение динамических зависимостей, полученных на основе разработанных математических моделей представленных систем управления с применением ПИ- и ПИД-регуляторов [3].

Для достижения поставленной цели необходимо было решить ряд задач:

- разработать модели системы прямого управления моментом на базе ПИ- и ПИД-регуляторов;
- получить динамические зависимости угловой скорости  $\omega(t)$ , момента на валу двигателя  $M(t)$ , токов статора  $I(t)$  и напряжений статора  $U(t)$ ;
- определить показатели качества, которые обеспечивают предложенные варианты систем управления;
- выполнить их сравнительный анализ.

В качестве объекта исследования был выбран асинхронный двигатель с короткозамкнутым (КЗ) ротором типа АИР100L2 [4], параметры которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Каталожные данные АД с КЗ ротором типа АИР100L2

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Значение
Номинальная мощность	$P_n$	кВт	5,5
Номинальная скорость	$n_n$	об/мин	2850
Номинальный ток	$I_n$	А	11
КПД	$\eta$	%	88
Коэффициент мощности	$\cos(\varphi)$	–	0,88
Кратность пускового тока	$I_n/I_n$	–	7,5
Кратность пускового момента	$M_n/M_n$	–	2,1
Кратность критического момента	$M_k/M_n$	–	2,4

В основу работы системы управления, как и в стандартном случае, положено уравнение электромагнитного момента АД [5]:

$$m = \frac{3}{2} z_p \frac{k_1 \cdot k_2}{\sigma \cdot L_m} |\psi_1 \times \psi_2| = \frac{3}{2} z_p \frac{k_1 \cdot k_2}{\sigma \cdot L_m} \psi_{1m} \cdot \psi_{2m} \cdot \sin \vartheta , \quad (1)$$

где  $\vartheta$  – пространственный угол между векторами потокоцеплений статора  $\psi_1$  и ротора  $\psi_2$  ;  
 $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты электромагнитной связи статора и ротора;  
 $\sigma$  – коэффициент рассеяния.

Цифровая математическая модель, разработанной системы управления в пакете программ MATLAB Simulink [6–9], представлена на рис. 1.

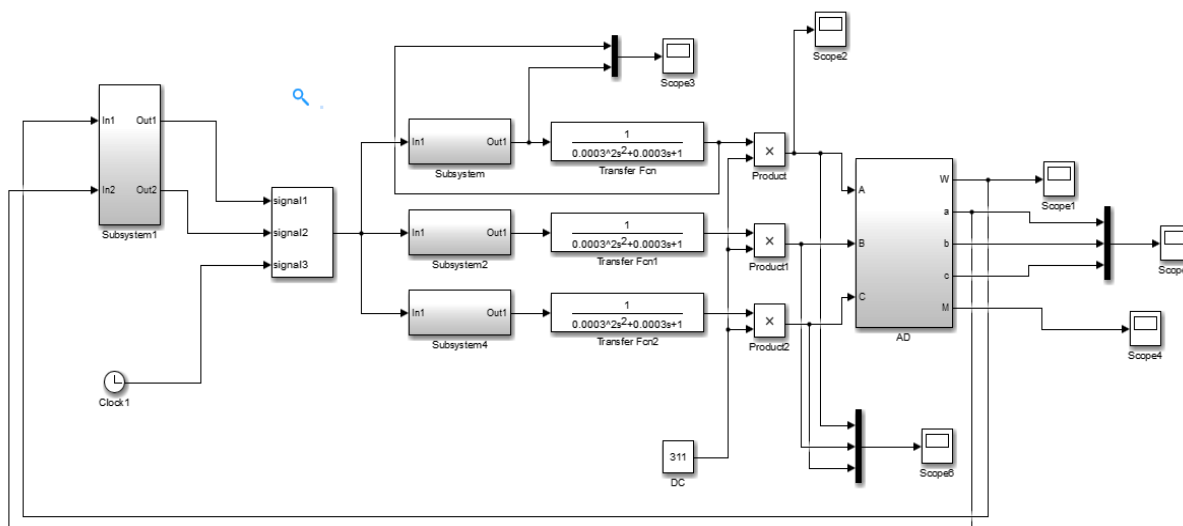


Рис. 1. Цифровая математическая модель системы с прямым управлением моментом АД с КЗ ротором

В приведенной системе управления в качестве сравнения были применены два типа регуляторов ПИ и ПИД, стандартные записи которых представлены ниже. ПИ-регулятор был настроен на симметричный оптимум, а ПИД-регулятор на технический [10]:

$$W(p)_{\text{ПИ}} = K_{\text{рег}} \cdot \left( 1 + \frac{1}{T_{\text{и}} \cdot p} \right) = K_{\text{рег}} + \frac{K_{\text{рег}}}{T_{\text{и}} \cdot p} ; \quad (2)$$

$$W(p)_{\text{ПИД}} = K_{\text{рег}} \cdot \left( 1 + \frac{1}{T_{\text{и}} \cdot p} + T_{\text{г}} \cdot p \right), \quad (3)$$

где  $K_{\text{рег}}$  – коэффициент усиления регулятора;  
 $T_{\text{и}}$  – постоянная времени интегрирования;  
 $T_{\text{г}}$  – постоянная времени дифференцирования.

Для выполнения поставленной задачи – определения показателей качества предложенных систем управления, необходимо было определить динамическую ошибку в виде перерегулирования:

$$\sigma = \frac{h_{\text{max}} - h_{\text{уст}}}{h_{\text{уст}}} \cdot 100\% , \quad (4)$$

где  $h_{\text{max}}$  – максимальное отклонение контролируемого параметра от его установившегося значения;  
 $h_{\text{уст}}$  – установившееся значение величины контролируемого параметра.

В результате моделирования были получены динамические зависимости угловой скорости, токов и напряжений статора, а также моментов в функции от времени соответственно, которые представлены на рис. 2–5. На всех рисунках под номером 1 представлены зависимости, полученные при использовании ПИ-регулятора, под номером 2 – зависимости с применением ПИД-регулятора.

Из приведенных выше зависимостей угловой скорости (рис. 2) видно, что разгон привода обеспечивается практически за одинаковое время  $t_{\text{разг}} = 0,7$  с. При набросе номинальной нагрузки в обоих случаях отсутствует статическая ошибка, однако присутствует динамическая. Полная стабилизация скорости в системе с ПИ-регулятором достигается за  $t_{\text{уп}} = 0,1$  с, а в системе с ПИД-регулятором за  $t_{\text{уп}} = 0,05$  с. Также стоит отметить, что в обоих случаях переходные процессы, при набросе нагрузки, проходят практически в пределах 5-ти процентной зоны.

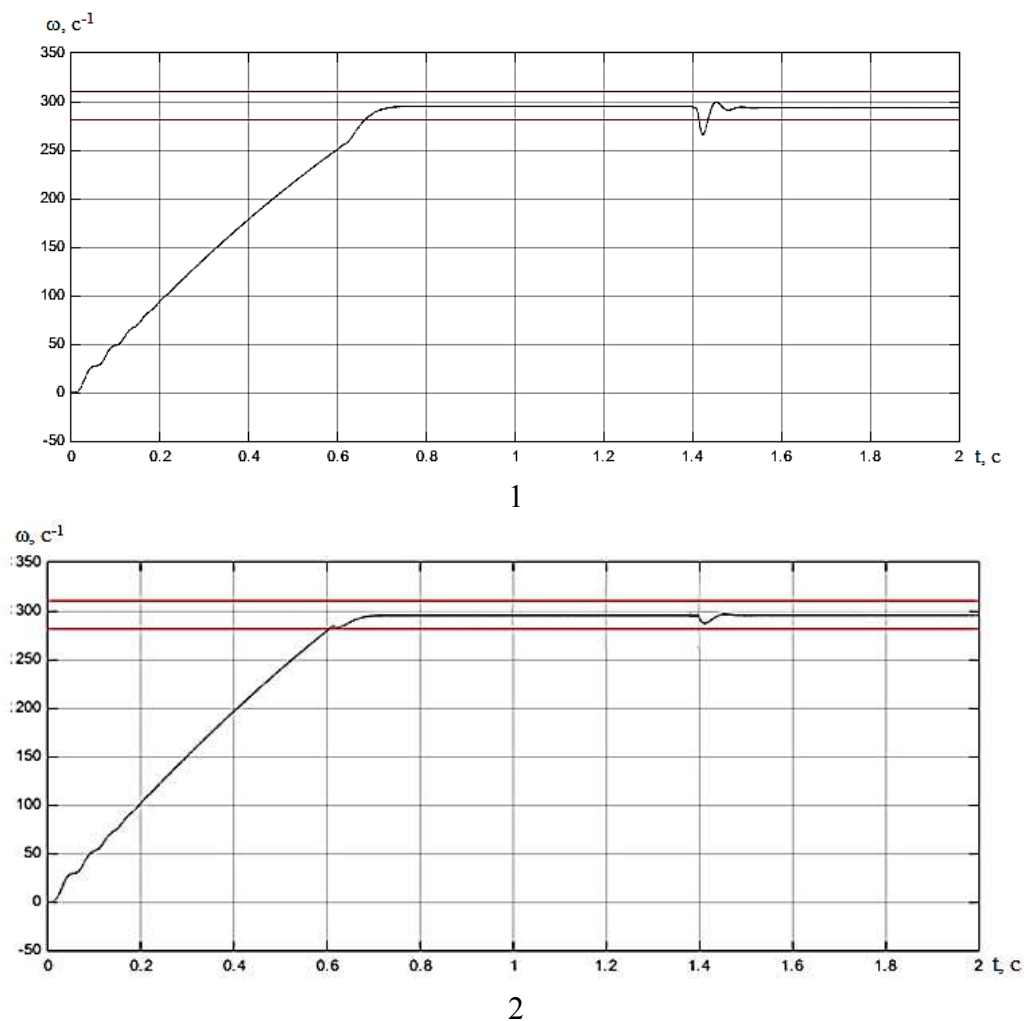
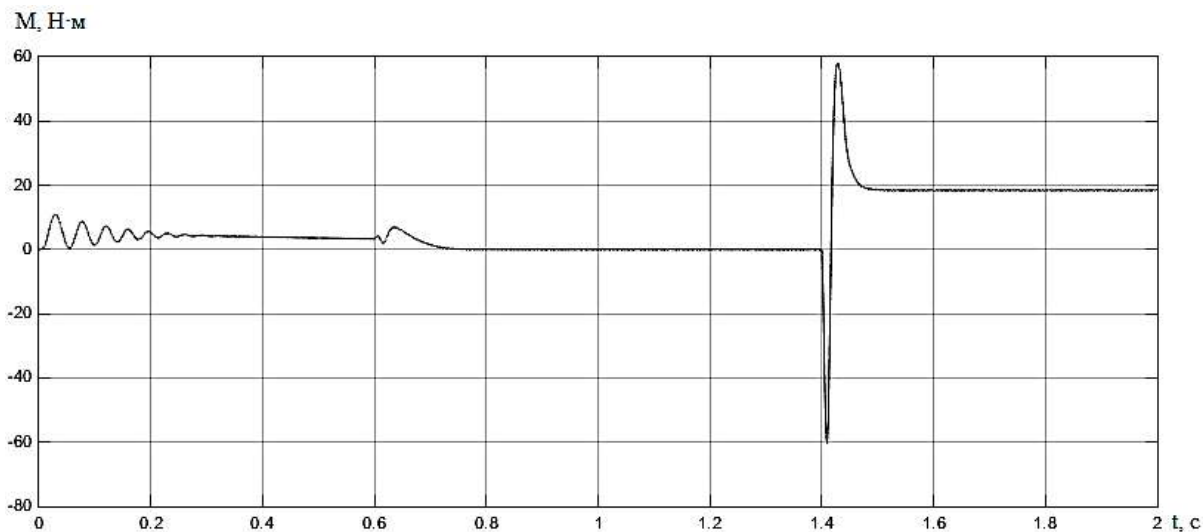
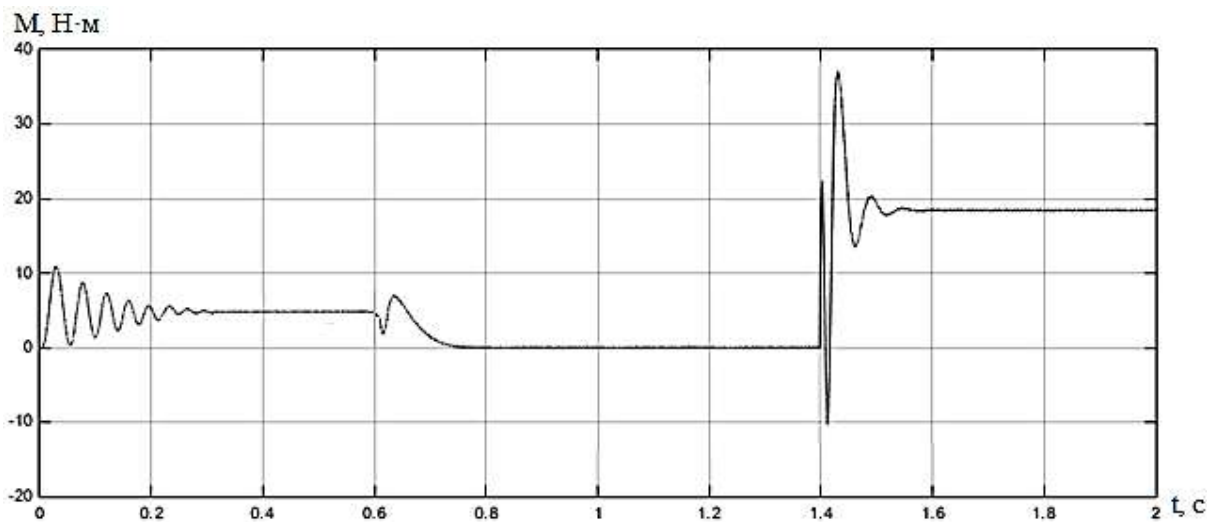


Рис. 2. Динамические зависимости угловой скорости

По приведенным зависимостям моментов (рис. 3) на участке пуска электродвигателя видно, что разработанная система управления обеспечивает стабилизацию электромагнитного момента на одном уровне  $M_{\text{пуск}} = 5,2$  (Н·м). Время достижения установившегося значения на пусковом участке в обоих случаях достигается за  $t_{\text{уп пуск}} = 0,25$  с. Однако в системе с ПИ-регулятором наблюдается незначительное падение момента на  $M_{\text{пад}} = 0,5$  (Н·м) (с 5,2 Н·м до 4,7 Н·м). При набросе номинальной нагрузки в системе с ПИ-регулятором наблюдается более высокое перерегулирование, однако данная система имеет меньшее время переходного процесса в отличие от системы с ПИД-регулятором,  $t_{\text{уп пид}} = 0,9$  с и  $t_{\text{уп пи}} = 0,45$  с. Также стоит отметить, что за счет использования в разработанной системе ШИМ, вместо традиционных релейных переключателей, практически отсутствуют пульсации момента.



1

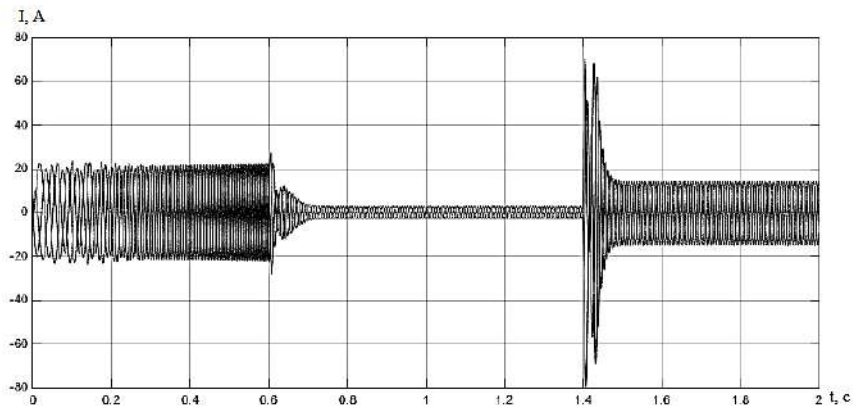


2

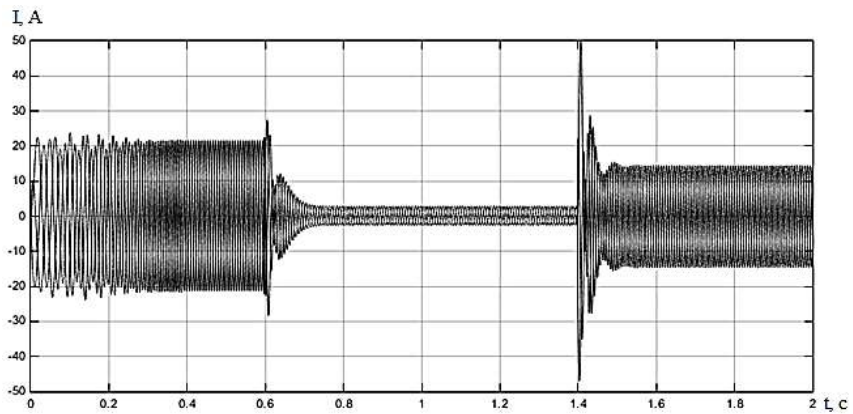
Рис. 3. Динамические зависимости момента на валу двигателя

Из приведенных зависимостей статорных токов (рис. 4) следует, что оба варианта систем управления обеспечивают их полную стабилизацию. На динамической зависимости токов системы с ПИ-регулятором наблюдается незначительное нарастание амплитуды  $I_{амп ПИ} = 22-22,8$  (А). Система с ПИД-регулятором обеспечивает стабилизацию тока на одном уровне  $I_{амп ПИД} = 22$  (А). При работе в режиме холостого хода амплитудные значения токов в обеих системах одинаковы  $I_{амп ХХ} = 3,5$  (А). Такое низкое значение достигается за счет использования более низкого напряжения питания при работе привода в данном режиме. При работе на участке номинальной нагрузки система с ПИ-регулятором имеет большее перерегулирование, а установившее амплитудное значение тока  $I_{амп Ном} = 15,2$  (А) в обоих случаях достигается за  $t_{уп Ном} = 0,1$  (с).

На представленных зависимостях статорных напряжений (рис. 5) наблюдается плавное нарастание амплитуды и частоты напряжения за  $t_{пуск} = 0,6$  с. На холостом ходу для питания используется пониженное напряжение, амплитудное значение которого  $U_{амп ХХ} = 135$  (В), что в свою очередь позволяет снизить энергозатраты. На участке номинального режима работы амплитуда напряжений возрастает к близкому своему номинальному значению  $U_{амп Ном} = 320$  (В). В системе с ПИ-регулятором наблюдается небольшое перерегулирование при набросе номинальной нагрузки, в отличие от системы с ПИД-регулятором.

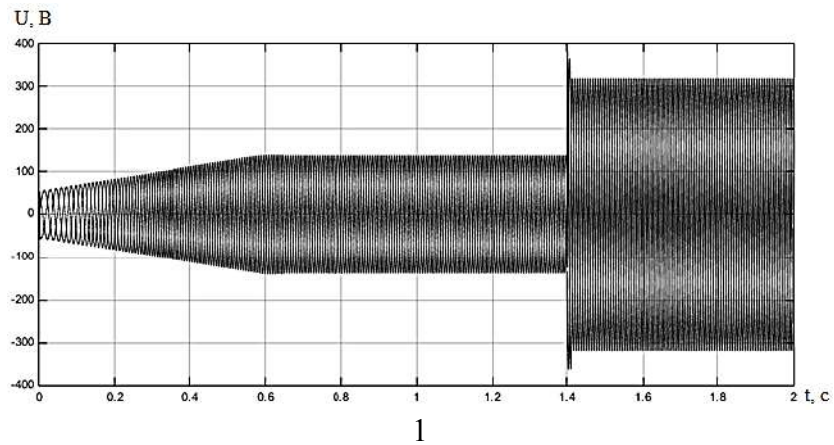


1

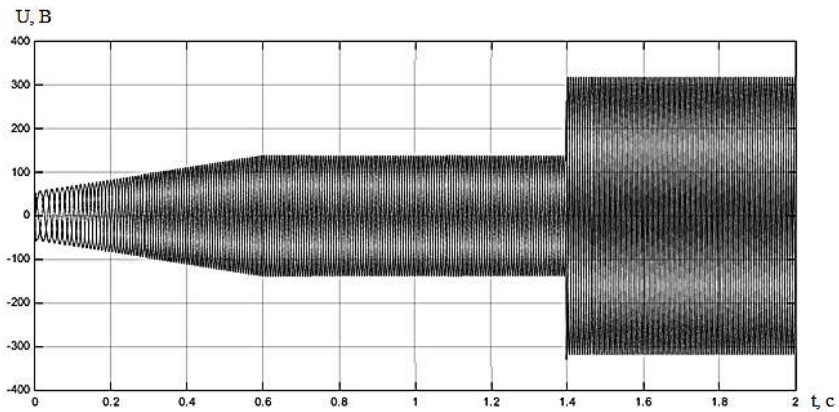


2

Рис. 4. Динамические зависимости токов статора



1



2

Рис. 5. Динамические зависимости статорных напряжений

По полученным результатам моделирования были определены основные показатели качества систем управления для угловой скорости и момента, значения которых представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Показатели качества по угловой скорости

Показатель качества	Режим	ПИ-регулятор	ПИД-регулятор
Время переходного процесса, $t_{\text{пн}}$	пуск	0,68 с	0,63 с
	ном. нагрузка	0,1 с	0,05 с
Перерегулирование, $\sigma$	пуск	–	–
	ном. нагрузка	8,6 %	4,1 %

Таблица 3

Показатели качества по моменту двигателя

Показатель качества	Режим	ПИ-регулятор	ПИД-регулятор
Время переходного процесса, $t_{\text{пн}}$	пуск	0,25 с	0,25 с
	ном. нагрузка	0,45 с	0,9 с
Перерегулирование, $\sigma$	пуск	101,9 %	101,2 %
	ном. нагрузка	227 %	102,2 %

Исследование работоспособности синтезированных систем управления осуществлялось не только при отработке возмущающего воздействия, но и при изменении входного задающего воздействия в виде сигнала управления при работе под нагрузкой.

В ходе исследований оказалось, что система управления, выполненная на основе ПИ-регулятора, с настройкой на симметричный оптимум является не работоспособной. Поэтому, исследования были проведены лишь для системы с наличием ПИД-регулятора. В результате моделирования были получены динамические зависимости угловой скорости, момента на валу двигателя, токов и напряжений статора, которые представлены на рис. 6–9.

Из приведенной зависимости угловой скорости ротора (рис. 6) видно, что система с наличием ПИД-регулятора работоспособна и обеспечивает стабилизацию скорости при снижении входного сигнала задания на 30 %. Однако, так как привод в это время находится под номинальной нагрузкой, что в свою очередь является довольно тяжелым режимом работы как для двигателя, так и для системы управления, то приведенный переходный процесс имеет колебательный характер и занимает около  $t_{\text{пн}} = 0,2$  с. Перерегулирование в данном случае не превышает 10 %, что говорит о том, что весь переходный процесс происходит в «5-ти процентной зоне».

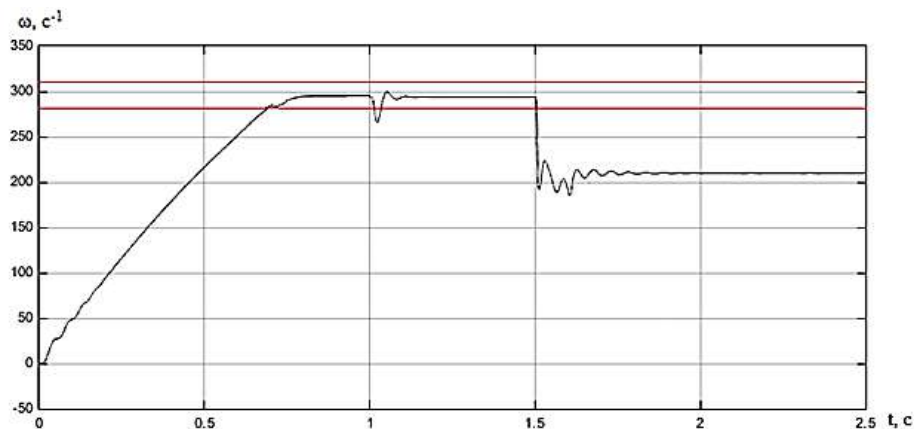


Рис. 6. Угловая скорость ротора

На представленной динамической зависимости момента (рис. 7), видно, что при работе под нагрузкой имеет место довольно значительное перерегулирование, которое превышает более чем 100 %. Время стабилизации момента, как и в случае с угловой скоростью, достигает  $t_{\text{пн}} = 0,2$  с.

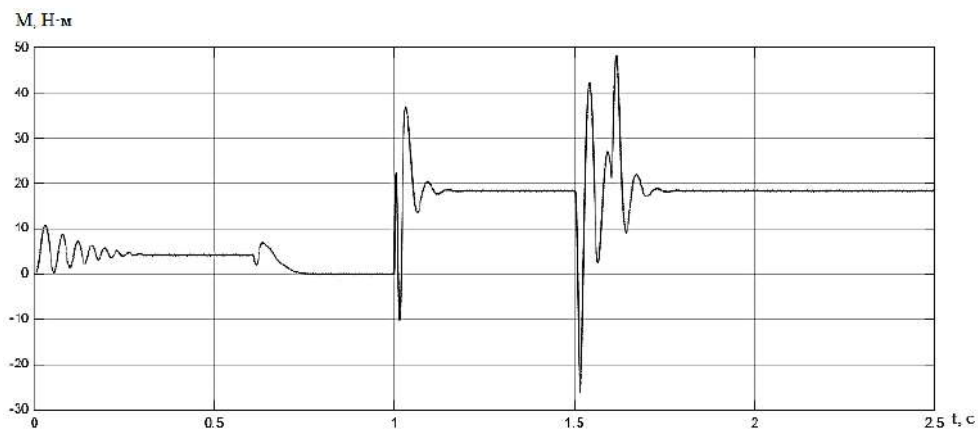


Рис. 7. Момент на валу двигателя

На приведенных зависимостях токов (рис. 8) и напряжений (рис. 9) статора можно увидеть, что при снижении сигнала задания плавно изменятся амплитуда напряжения  $U = 320 - 270$  (В) и его частота соответственно. Также стоит отметить, что в случае с током статора, обеспечивается его контроль, хотя и имеет место динамическая ошибка. Переходный процесс по токам статора, как в предыдущих случаях, занимает  $t_{\text{пн}} = 0,2$  с.

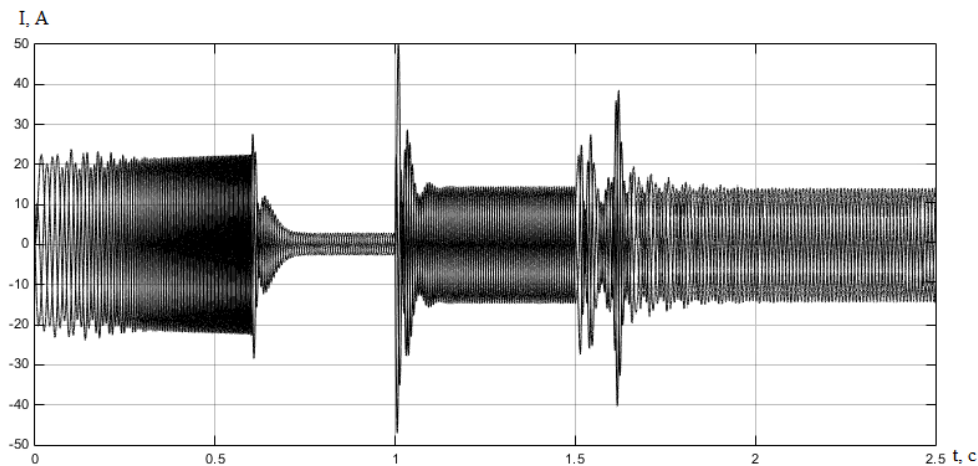


Рис. 8. Динамическая зависимость статорных токов двигателя

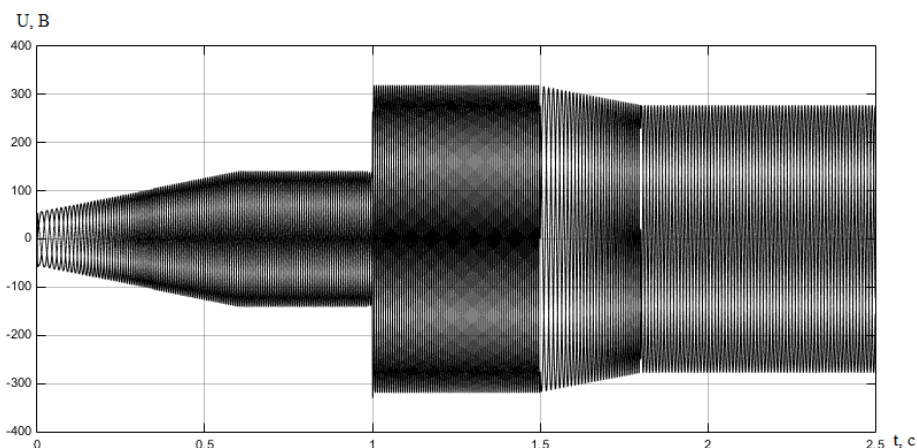


Рис. 9. Динамическая зависимость напряжений статора двигателя

## ВЫВОДЫ

Из анализа приведенных выше зависимостей следует, что:

- оба предложенных варианта систем управления обеспечивают стабилизацию угловой скорости с нулевой статической ошибкой;
- при этом имеет место перерегулирование, в системе с ПИ-регулятором практически в 2 раза превышает достигнутое значение в системе с ПИД-регулятором;
- обе системы обеспечивают контроль момента при пуске;
- при набросе номинальной нагрузки в динамике обеих систем прослеживается значительное перерегулирование от 100 до 200 %;
- также как и в случае с моментом, предложенные варианты систем управления обеспечивают стабилизацию тока при пуске;
- из анализа приведенных зависимостей напряжений статора следует, что за счет плавного нарастания амплитуды и частоты обеспечивается плавный пуск электродвигателя и контроль электромагнитного момента;
- при исследовании привода на предмет устойчивости в наиболее сложных режимах работы, а именно под нагрузкой, следует, что система с ПИД-регулятором выполняет поставленные задачи. Однако в результате довольно высокой динамической ошибки данный вариант системы управления требует доработки для реализации высокоточных приводов, возможного применения регулятора на основе набора нечетких правил (Fuzzy Logic).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Behera P. K. *Speed control of Induction Motor using Scalar Control Technique* / P. K. Behera, A. K. Sahoo // *International Journal of Computer Applications*. – ETCC, 2014. – Pp. 37–39.
2. Kvashnin V. *Modeling systems direct torque control using a three-phase mathematical model* / V. Kvashnin, V. Kosenko // *Electrotechnic and Computer Systems*. – 2016. – N 22(98). – Pp. 56–61.
3. Квашинин В. О. *Построение и исследование модели системы прямого управления моментом для минимизации пульсаций электромагнитного момента* / В. О. Квашинин, Ю. Н. Чередник // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – 2012. – № 3. – С. 382–384.
4. *Каталог асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором [Электронный ресурс]*. – Режим доступа: <http://www.electronpro.ru/production>.
5. Alnasir Z. A. *Design of direct torque controller of induction motor (DTC)* / Z. A. Alnasir // *International Journal of Engineering and Technology*. – IJET, 2012. – Pp. 54–70.
6. Квашинин В. О. *Разработка динамической модели асинхронного двигателя* / В. О. Квашинин // *Вісник Східноукраїнського Національного університету*. – Луганськ, 2006. – № 1(95). – С. 87–91.
7. Квашинин В. О. *Анализ построения динамической модели асинхронного двигателя на основе расчетных и каталожных данных* / В. О. Квашинин, В. А. Косенко // *Електротехнічні і комп'ютерні системи*. – Одеса, 2014 – С. 241–244.
8. Черных И. В. *Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink* / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
9. Miloje M. *Kostić Equivalent circuit improvement method for induction motor efficiency* / Miloje M. Kostić // *Electrical Engineering Institute Nikola Tesla*. – Belgrade University, Serbia, April 2012. – Pp. 31–42.
10. Зайцев Г. Ф. *Основы автоматического управления и регулирования* / Г. Ф. Зайцев, В. И. Костюк, П. И. Чинаев. – К.: Техника, 1977. – 472 с.