

УДК 62-83-52

## **АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА НА ОСНОВЕ АСИНХРОННО-ВЕНТИЛЬНОГО КАСКАДА С РАЗЛИЧНЫМИ СИСТЕМАМИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАГРУЗОЧНОГО МОМЕНТА**

**И. В. ДОРОЩЕНКО**

*Учреждение образования « Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

**Ключевые слова:** асинхронно-вентильный каскад, испытательный стенд, структурная схема, инвариантность по моменту, динамика.

### **Введение**

Основная часть технологических процессов практически во всех отраслях промышленности не может быть реализована без использования электрических машин и двигателей внутреннего сгорания. Высокая надежность работы этих машин обеспечивает безаварийность и является гарантом безопасности людей в указанных отраслях промышленности. Повышение надежности работы и снижение энергоемкости электродвигателей и двигателей внутреннего сгорания являются общими мировыми тенденциями развития машиностроения, особенно производства рабочих машин и устройств. Важную роль при разработке и изготовлении новых рабочих машин выполняют их стендовые испытания. Современные испытательные стенды должны обеспечивать автоматическое управление процессом испытаний при максимально возможном энергосбережении. С целью проведения достаточно точных и качественных испытаний необходимо обеспечить инвариантность нагрузочного момента в широком диапазоне изменения скорости вращения [1], [2], [7].

Целью работы является исследование динамических показателей энергосберегающего испытательного стенда на основе АВК с системой подчиненного регулирования нагрузочного момента и инвариантной системой нагрузочного момента методами имитационного моделирования в среде MatLab.

### **Основная часть**

Нагрузочная часть электромеханического испытательного стенда на основе АВК (рис. 1) включает асинхронный нагрузочный двигатель, работающий в генераторном режиме М1 и приводной (испытуемый) двигатель М2. Обмотка статора машины М1 подключается непосредственно к трехфазной сети переменного тока. Обмотка ротора машины М1 подключена к трехфазному входу неуправляемого выпрямителя UZ1. Неуправляемый выпрямитель предназначен для преобразования трехфазной переменной ЭДС ротора асинхронной машины М1 в постоянное (выпрямленное) напряжение. Выход неуправляемого выпрямителя UZ1 через дроссель соединен с выходом управляемого преобразователя UZ2. Управляемый преобразователь UZ2, работающий в режиме инвертора, предназначен для регулирования нагрузки в цепи ротора асинхронной машины М1. Вход управляемого преобразователя UZ2 соединен со вторичной обмоткой согласующего трансформатора Т, первичная обмотка которого

подключена к той же сети переменного тока, что и обмотка статора асинхронной машины M1. Энергия скольжения асинхронной машины M1 через управляемый преобразователь UZ2 и согласующий трансформатор возвращается в сеть переменного тока, чем достигается повышение энергоэффективности испытаний [5].

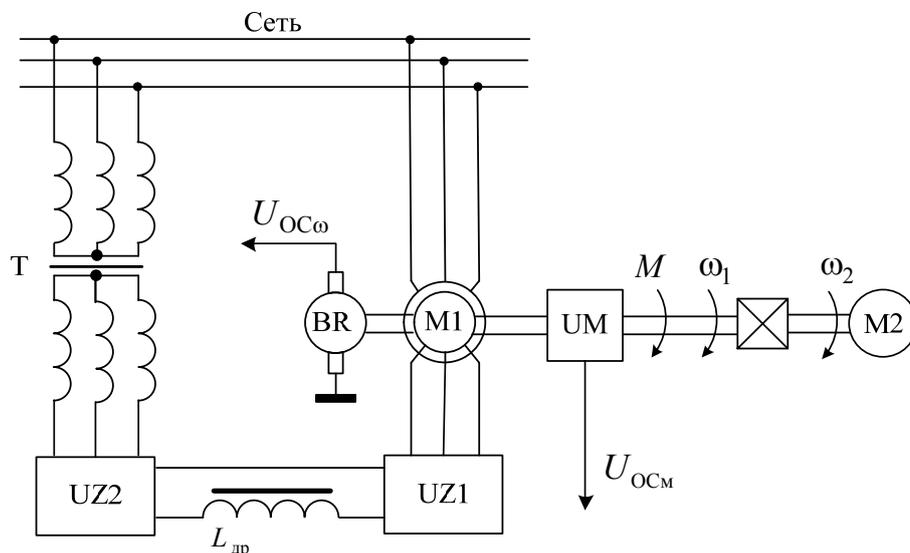


Рис. 1. Функциональная схема силовой части испытательного стенда на основе АВК:  
M1 – асинхронный двигатель с фазным ротором; M2 – испытуемый двигатель;  
UZ1 – трехфазный мостовой выпрямитель; UZ2 – трехфазный мостовой управляемый инвертор; UM – датчик момента; BR – датчик скорости вращения

Анализ материалов опубликованных научных исследований в области построения испытательных стендов на основе АВК показывает, что построение структур данных стендов выполняется по двум типам систем автоматического регулирования (САР):

- подчиненного регулирования (с регулированием момента и выпрямленного тока ротора) [2]–[4];
- инвариантной системе регулирования нагрузочного момента [5].

Расчет и построение САР подчиненного регулирования нагрузочной части испытательного стенда на основе АВК производится исходя из уравнений цепи выпрямленного тока ротора, при этом наиболее часто используются двухконтурные САР (рис. 2). Внутренним (подчиненным) контуром является контур регулирования выпрямленного тока, а внешним контур регулирования нагрузочного момента.

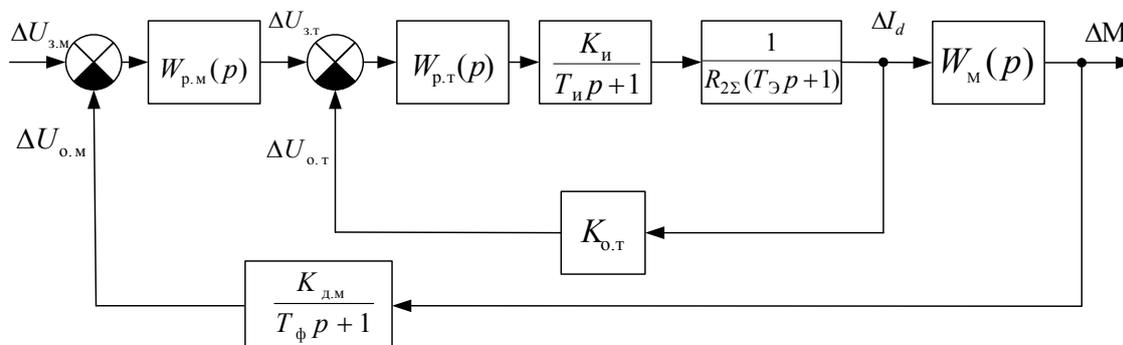


Рис. 2. Структурная схема двухконтурной системы подчиненного регулирования нагрузочного момента испытательного стенда на основе АВК

На схеме (рис. 2) обозначено:  $W_{p.m}(p)$  – передаточная функция регулятора момента;  $W_{p.t}(p)$  – передаточная функция регулятора тока;  $W_m(p) = \frac{k_U}{\omega_0} (U_2 - \sqrt{2}I_d x_p)$  – передаточная функция динамического звена электромеханического преобразования [2, с. 105–107];  $T_{и}$ ,  $K_{и}$  – постоянная времени и коэффициент передачи инвертора в роторной цепи;  $T_{\Sigma}$  – постоянная времени цепи выпрямленного тока ротора;  $R_{\Sigma}$  – суммарное активное сопротивление роторной цепи с учетом инвертора;  $K_{o.t}$  – коэффициент передачи датчика тока;  $K_{d.m}$  – коэффициент передачи датчика момента;  $T_{\phi}$  – постоянная времени фильтра.

Особенностью такого подхода является пренебрежение электромагнитными нестационарными процессами в асинхронной машине, а электромагнитные процессы цепи выпрямленного тока ротора рассматриваются исходя из «гладких» составляющих ЭДС роторной и сетевой групп вентилей [2, с. 105].

Согласно настройке на модульный оптимум необходим пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор тока и интегральный регулятор момента.

При построении инвариантной САР нагрузочной части испытательного стенда на основе АВК обеспечивается при использовании положительной обратной связи по моменту и отрицательной по скорости [5], [6]. Для анализа и синтеза электропривода инвариантно-го электромеханического стенда с рекуперацией энергии на основе АВК (рис. 3).

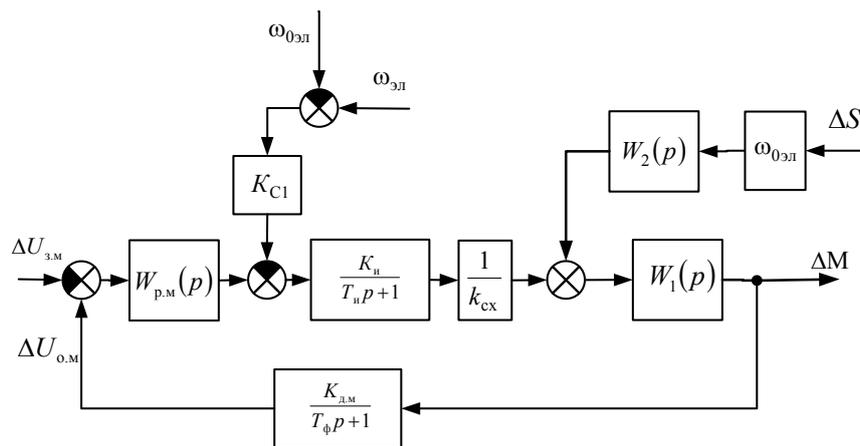


Рис. 3. Структурная схема инвариантной системы автоматического регулирования стенда на основе АВК

На схеме обозначено:

$$W_1(p) = - \frac{T_{2\Sigma}(T_{2\Sigma}p+1)}{(1+(T_{2\Sigma}\omega_{0эл}S_{нач})^2)(T_1^2p^2+2\xi_1T_1p+1)} \frac{p_d K_{c1} U'_{1m}}{L_{\sigma\Sigma} \omega_{0эл}},$$

$$W_2(p) = \frac{(\Psi_{2y} - T_{2\Sigma}\omega_{0эл}S_{нач}\Psi_{2x})(T_2p+1)}{(T_{2\Sigma}p+1)},$$

где  $K_{c1}$  – коэффициент согласования;  $k_{cx}$  – схемный коэффициент инвертора;  $U'_{1m}$  – амплитуда напряжения статора, приведенного к цепи ротора;  $\omega_{0эл}$  – угловая синхронная скорость каскада;  $p_d$  – число пар полюсов двигателя;  $T_{и}$  – постоянная времени инвертора в роторной цепи;  $K_{и}$  – коэффициент передачи инвертора в роторной

цепи;  $K_1 = \frac{L_{12}}{L_1}$  – коэффициент магнитной связи статора;  $L'_{\sigma\Sigma} = \frac{L_1 L_{2\Sigma} - L_{12}^2}{L_1}$  – эквивалентная индуктивность рассеяния статора;  $L_1$  – индуктивность рассеяния обмотки статора;  $L_{2\Sigma}$  – суммарная индуктивность цепи ротора;  $L_{12}$  – взаимная индуктивность;  $T_{2\Sigma} = \frac{L'_{\sigma\Sigma}}{R_{2\Sigma}}$  – эквивалентная суммарная постоянная времени ротора;  $R_{2\Sigma}$  – суммарное активное сопротивление роторной цепи;  $T_1 = \frac{T_{2\Sigma}}{\sqrt{1 + (T_{2\Sigma} \omega_{0эл} S_{нач})^2}}$  – постоянная времени;  $\xi_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + (T_{2\Sigma} \omega_{0эл} S_{нач})^2}}$  – коэффициент затухания;  $S_{нач}$  – начальное значение скольжения асинхронно-вентильного каскада в рабочей точке;  $T_2 = \frac{T_{2\Sigma} \Psi_{2y}}{\Psi_{2y} - T_{2\Sigma} \omega_{0эл} S_{нач} \Psi_{2x}}$  – постоянная времени;  $\Psi'_{1x}$ ,  $\Psi'_{1y}$ ,  $\Psi_{2x}$ ,  $\Psi_{2y}$  – потокосцепления статора и ротора.

Согласно рекомендациям [6], [7] для инвариантной САР нагрузочной части испытательного стенда на основе АВК при синтезе на модульный оптимум необходим ПИ регулятор момента.

Имитационная модель нагрузочной части испытательного стенда на базе АВК с САР нагрузочного момента (рис. 4) строилась в Matlab Simulink на основе функциональной схемы силовой части (см. рис. 1) и структурных схем исследуемого стенда (см. рис. 2 и 3).

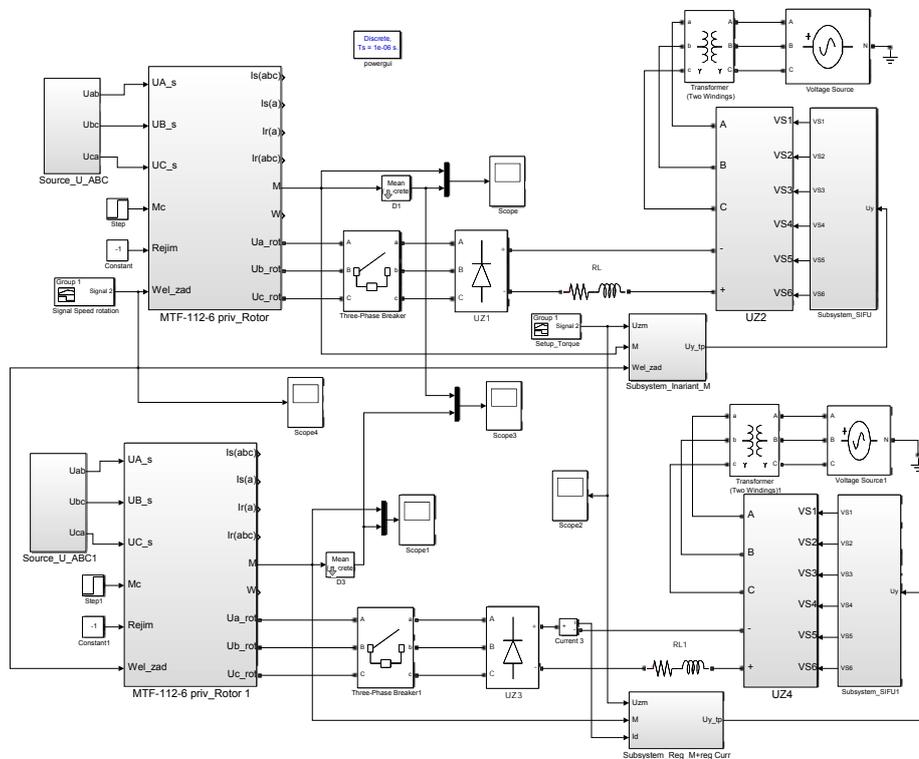


Рис. 4. Имитационная модель нагрузочной части стенда на основе АВК с САР нагрузочного момента в Matlab Simulink

Численное моделирование нагрузочной части испытательного стенда на базе АВК производилось для асинхронного двигателя с фазным ротором марки МТФ 112–6 и согласующего трансформатора марки ТСТ-6,3 УХЛ4. Используя представленные в [5], [6] соотношения, был произведен расчет параметров и синтез регулятора для исследуемых САР.

Для полученной имитационной модели производился расчет следующих переходных процессов (рис. 5–7):

- 1) повышение скорости вращения (увеличение угловой скорости вращения на 20 рад/с), при неизменном сигнале задания момента  $U_{3.М} = -2$  В (по возмущению);
- 2) повышение скорости вращения (увеличение угловой скорости вращения на 70 рад/с), при неизменном сигнале задания момента  $U_{3.М} = -2,5$  В (по возмущению);
- 3) понижение сигнала задания момента с  $U_{3.М} = -2,5$  В до  $U_{3.М} = -6$  В, при постоянной скорости вращения (по управлению).

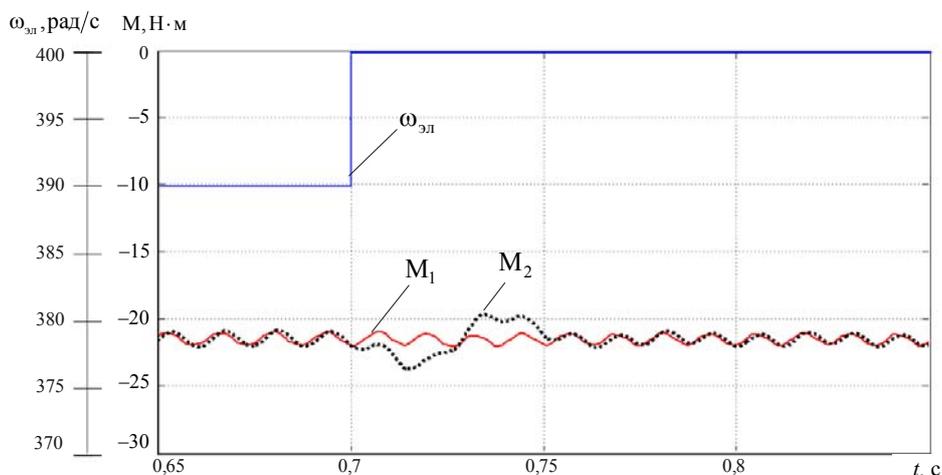


Рис. 5. Переходные процессы при изменении скорости вращения и постоянном сигнале задания момента:

$M_1$  – среднее значение момента для модели инвариантной САР;  
 $M_2$  – среднее значение момента для модели САР подчиненного регулирования;  
 $\omega_{эл}$  – угловая скорость вращения ротора

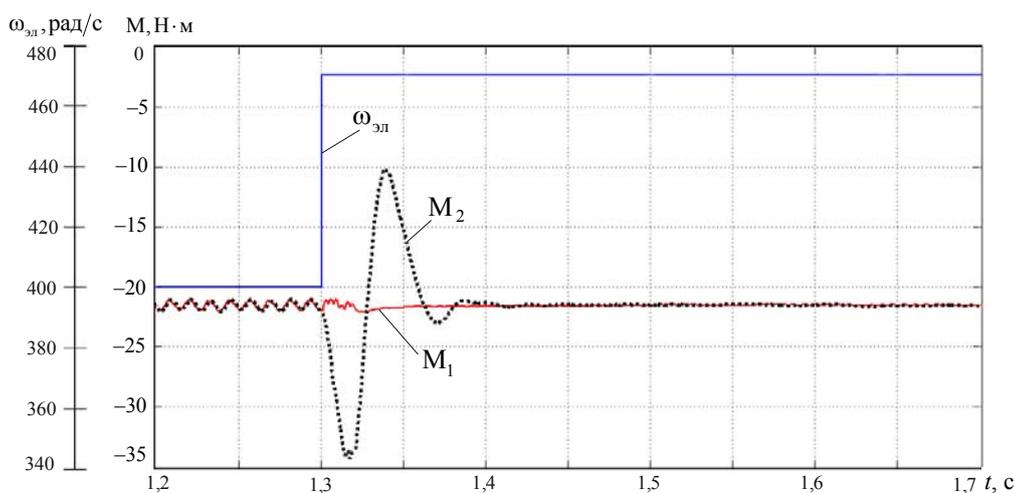


Рис. 6. Переходные процессы при изменении скорости вращения и постоянном сигнале задания нагрузочного момента:

$M_1$  – среднее значение момента для модели инвариантной САР;  
 $M_2$  – среднее значение момента для модели САР подчиненного регулирования;  
 $\omega_{эл}$  – угловая скорость вращения ротора

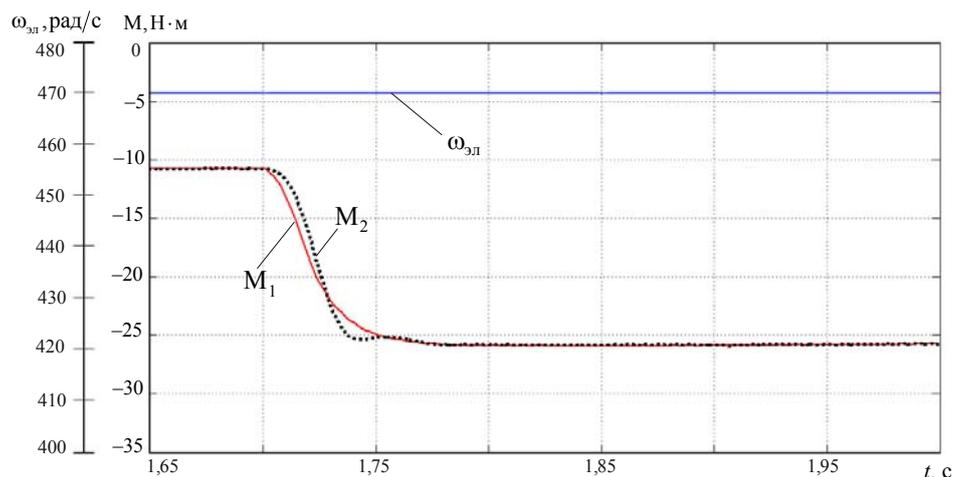


Рис. 7. Переходные процессы при изменении сигнала задания нагрузочного момента и постоянной скорости вращения:  
 $M_1$  – среднее значение момента для модели инвариантной САР;  
 $M_2$  – среднее значение момента для модели САР подчиненного регулирования;  
 $\omega_{эл}$  – угловая скорость вращения ротора

Имитационное моделирование показало, что нагрузочный момент имеет пульсирующий характер, а его значение зависит от частоты тока ротора. При анализе показателей качества переходных процессов (рис. 5–7) будем использовать среднее значение момента за период частоты сети.

В результате сравнительного анализа переходных процессов установлено:

– при изменении скорости вращения и постоянном сигнале задания момента для САР подчиненного регулирования перерегулирование составляет  $\sigma_{\%} \approx 9,3\%$ , время регулирования  $t_{п.п} \approx 0,05$  с, для инвариантной САР перерегулирование  $\sigma_{\%} \approx 0,14\%$ , время регулирования  $t_{п.п} \approx 0,02$  с (рис. 5);

– при изменении скорости вращения и постоянном сигнале задания момента для САР подчиненного регулирования перерегулирование составляет  $\sigma_{\%} \approx 36,8\%$ , время регулирования  $t_{п.п} \approx 0,1$  с, для инвариантной САР перерегулирование  $\sigma_{\%} \approx 1,6\%$ , время регулирования  $t_{п.п} \approx 0,06$  с (рис. 6);

– при изменении сигнала задания нагрузочного момента и неизменной скорости для обеих САР перерегулирование отсутствует при равном времени регулирования  $t_{п.п} \approx 0,07$  с (рис. 7).

Время регулирования и перерегулирование при изменении скорости вращения электромеханического стенда с рекуперацией энергии на основе АВК с инвариантной САР лучше ожидаемых при синтезе на модальный оптимум ( $t_{п.п} = 0,072$  с и  $\sigma_{\%} \approx 4,3\%$ ).

Для подтверждения адекватности имитационной модели нагрузочной части стенда на основе АВК было проведено экспериментальное исследование токов на опытном образце нагружающего стенда с рекуперацией энергии в сеть на основе АВК с тиристорным инвертором в цепи ротора и инвариантной системой автоматического регулирования нагрузочного момента (с асинхронным двигателем МТФ 112–6 и согласующим трансформатором марки ТСТ-6,3 УХЛ4).

Эксперимент проводился для генераторного режима работы при сигнале задания момента  $U_{3.м} = -3$  В, частоте вращения генератора  $\omega = 170,7$  с<sup>-1</sup>, при этом нагрузоч-

ный момент составил  $M_c = 18$  Нм. На рис. 8 представлены экспериментальные и расчетные формы токов статора асинхронной машины, входящей в состав АВК, и сетевой обмотки согласующего трансформатора, подключенного к тиристорному инвертору.

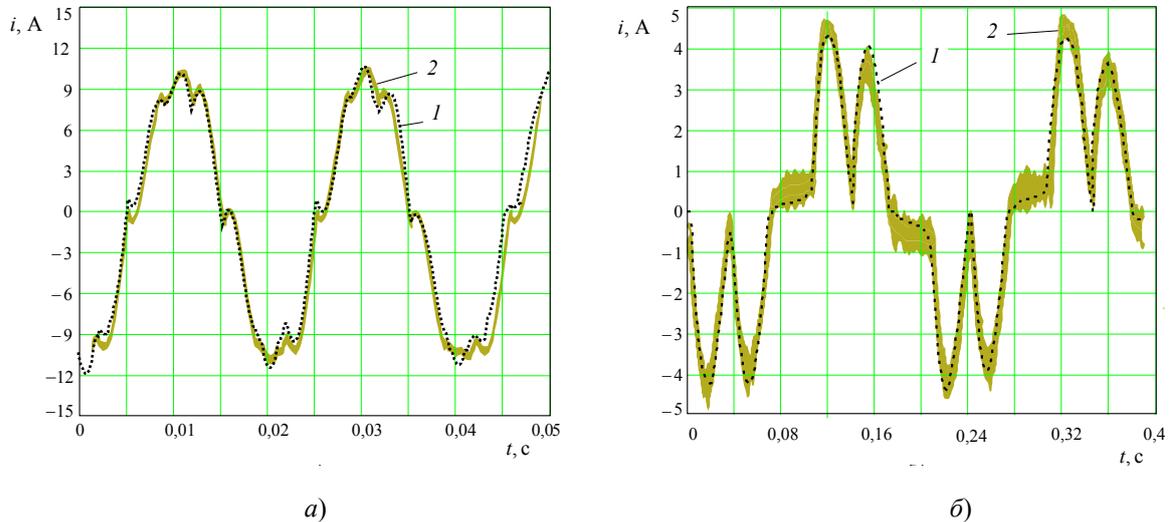


Рис. 8. Формы фазных токов: статора двигателя (а) и сетевой обмотки согласующего трансформатора в роторной цепи (б): 1 – расчет; 2 – эксперимент

Проанализировав форму токов АВК полученных при экспериментальном исследовании и расчетном имитационном моделировании (рис. 8), видно, что имитационное моделирование стенда на основе АВК позволяет получить достаточно достоверные данные по значениям и искажениям токов в инвариантном испытательном стенде с рекуперацией энергии на основе АВК. Погрешность среднего значения токов составляет не более 5 %, погрешность амплитуды мгновенного значения токов составляет порядка 7 %.

### Заключение

Построение нагрузочной части стенда на основе АВК с инвариантной САР по нагрузочному моменту обеспечивает в 20 раз меньшее перерегулирование нагрузочного момента и в 1,5 раза меньшее время регулирования по сравнению с САР подчиненного регулирования.

Применение инвариантной САР в испытательных стендах с рекуперацией энергии на основе АВК позволит уменьшить броски нагрузочного момента и рекуперированных в сеть токов в динамических режимах.

### Литература

1. Тодарев, В. В. Энергосберегающие электромеханические стенды для испытания двигателей внутреннего сгорания и трансмиссий сельскохозяйственной техники / В. В. Тодарев, М. Н. Погуляев, И. В. Дорощенко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. Випуск 101 «Проблеми енергозабезпечення та енергосбереження в АПК України». – Харків : ХНТУСГ, 2010. – С. 90–91.
2. Асинхронно-вентильные нагружающие устройства / С. В. Хватов [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.

3. Фираго, Б. И. Теория электропривода : учеб. пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Палявичик. – Минск : Техноперспектива, 2004. – 527 с.
4. Чиликин, М. Г. Теория автоматизированного электропривода / М. Г. Чиликин, В. И. Ключев, А. С. Сандлер. – М. : Энергия, 1979. – 616 с.
5. Нагрузочное устройство : пат. 16927 С2 Респ. Беларусь, МПК G 01 M 15/00 / В. С. Захаренко, И. В. Дорощенко, В. А. Савельев ; заявитель Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – № а20101749 ; заявл. 03.12.2010 ; опубл. 30.04.2013 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 2. – С. 128.
6. Дорощенко, И. В. Математическая модель нагрузочной части испытательного стенда инвариантного к скорости вращения на основе асинхронно-вентильного каскада / И. В. Дорощенко, В. С. Захаренко, В. А. Савельев // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2013. – № 3. – С. 63–72.
7. Дорощенко, И. В. Динамика инвариантного испытательного стенда на основе асинхронно-вентильного / И. В. Дорощенко, В. С. Захаренко // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2013. – Т. 322, № 4. – С. 110–115.
8. Дорощенко, И. В. Имитационная модель асинхронно-вентильного каскада в Matlab Simulink / И. В. Дорощенко // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XV науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 23–24 апр. 2015 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2015. – С. 264–267.

*Получено 28.02.2017 г.*