

УДК 621.313.3

Ф. Ш. Аль Махтури, Д. В. Самохвалов, А. И. Джабер, Н. И. Татаринцев  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Испытательный стенд для бездатчикового управления моментом нагрузки бесконтактной машины постоянного тока

*Рассмотрена концепция построения нагрузочного стенда для бесконтактной машины постоянного тока с использованием асинхронного двигателя, питающегося от промышленного преобразователя частоты с векторным управлением и возможностью управления моментом. Это позволяет отказаться от использования датчика момента, удешевляет систему и упрощает конструкцию электромеханической части стенда. Данный стенд предназначен для исследования характеристик бесконтактной машины постоянного тока, работающей как в двигательном, так и в генераторном режимах. Рассмотрена автоматическая настройка для идентификации параметров асинхронного двигателя, необходимой для перевода преобразователя частоты в режим управления моментом. Приведена процедура настройки параметров преобразователя частоты в режиме управления моментом.*

### Бесконтактная машина постоянного тока, нагрузочный стенд, автоматическая настройка, режим управления моментом, момент нагрузки, асинхронный двигатель

В последние десятилетия, благодаря развитию силовой электроники, бесконтактные машины постоянного тока (БМПТ), работающие в двигательном режиме, стали широко использоваться в области тяговых электроприводов для легковой электротяги (в электромобилях, электроскутерах, электровелосипедах, беспилотных, наземных и летательных аппаратах) [1].

Применение БМПТ стало актуальным благодаря таким их преимуществам, по сравнению с электромеханическими преобразователями других типов, как бесконтактность, низкая себестоимость, простота конструкции и, как следствие, малое время восстановления системы, высокое отношение момент/масса, высокое значение КПД. Большое значение момента при низких скоростях, а также большая мощность при большом количестве пар полюсов делают БМПТ конкурентоспособными для применения в качестве ветрогенератора в электрических ветроустановках [2].

БМПТ является объединением синхронной машины с постоянными магнитами, силовой части и системы управления, которые часто выпускаются разными производителями. Для каждого конкретного применения необходимо определять характеристики системы в предусмотренных рабочих режимах для проверки выполнения требова-

ний, предъявляемых к продукции [3]. По этой причине возникает необходимость создания экспериментальной установки для исследования характеристик БМПТ. Измерение момента необходимо для определения КПД БМПТ при оценке эффективности различных методов управления двигателем.

Существуют различные методы измерения момента нагрузки, которое является частью типовых испытаний (при получении механических характеристик, определение КПД) [4] и проводится при исследовании характеристик БМПТ. При этом используются, например, индуктивные или тензометрические датчики.

Разработка нагрузочного устройства с использованием датчиков момента достаточно трудоемка и требует проведения ОКР, а датчики момента, выпускаемые промышленностью, имеют крайне высокую стоимость.

В [5] рассматривается испытательный стенд, построенный на базе двух асинхронных частотно-регулируемых электроприводов, где один из электроприводов – исследуемый, а второй – нагрузочный. Точность косвенного измерения момента асинхронного двигателя с питанием от преобразователя частоты рассматривается в [6], [7]. Измерения проводились для двигателей средней (7.5 кВт) и малой (0.5 кВт) мощностей. Было

применено векторное управление асинхронным двигателем и сравнивалась точность измерения момента при наличии и отсутствии датчика скорости.

В [8] изучается точность оценки скорости вращения, крутящего момента и мощности на валу с помощью лабораторных испытаний с использованием двух преобразователей частоты. По результатам испытаний сравнивается точность оценки момента для преобразователя частоты с векторным управлением и с прямым управлением моментом. Оценка крутящего момента проводится для бездатчиковой диагностики и мониторинга в системах, использующих асинхронный электропривод, питающийся от преобразователя частоты.

Производители преобразователей частоты редко публикуют материалы, содержащие информацию об ожидаемой точности оценки момента на валу асинхронного двигателя. В [9] изучается точность оценки крутящего момента на валу асинхронного двигателя с помощью лабораторных измерений с использованием преобразователя частоты с векторным управлением как в установившемся, так и в динамическом режимах. Кроме того, изучается влияние функции оптимизации потока на точность оценки момента.

В данной статье для решения задачи измерения момента БМПТ предлагается использовать асинхронный двигатель, питающийся от преобразователя частоты (ПЧ) с векторным управлением, работающего в режиме управления моментом. Описывается процесс задания момента нагрузки, процесс автонастройки ПЧ и его перевода в режим управления моментом.

**Описание нагрузочного стенда.** Структурная схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Испытуемая бесконтактная машина постоянного тока БМПТ IBL-100SW02, включаю-

щая в себя автономный инвертор напряжения АИН и синхронную машину с постоянными магнитами СМПМ, установлена на прочной раме, которая соединяется с рамой нагрузочного асинхронного двигателя АД ST80LB. Вал БМПТ соединяется с валом АД с помощью упругой кулачковой муфты М.

Асинхронный двигатель питается от преобразователя частоты ПЧ, подключенного к трехфазной сети переменного тока. Сигнал задания момента поступает на аналоговый вход ПЧ F7Z6 [10] от программируемого логического контроллера ПЛК. Ввод параметров асинхронного двигателя в ПЧ для автоматической настройки ПЧ и перевода ПЧ в режим управления моментом производится из программы CX-Drive, установленной на персональном компьютере ПК. Обратная связь по скорости поступает в ПЧ от инкрементального оптического датчика (энкодера), установленного на валу асинхронного двигателя. БМПТ питается от аккумуляторной батареи напряжением 48 В. Параметры асинхронного двигателя серии ST80LB, используемого для создания момента нагрузки БМПТ, приведены в табл. 1 [11].

Таблица 1

Параметр	Значение
Номинальная мощность $P_{\text{ном}}$ , кВт	1.1
Номинальная скорость вращения $\omega$ , рад/с	200
Число пар полюсов $p$	4
Соппротивление статора $R_1$ , Ом	4.500
Соппротивление ротора $R_2$ , Ом	2.533
Индуктивность рассеяния статора $L_1$ , мГн	5.078
Индуктивность рассеяния ротора $L_2$ , мГн	8.576
Индуктивность намагничивания $L_m$ , мГн	1.225
Момент инерции ротора $J$ , кг·м <sup>2</sup>	0.0025

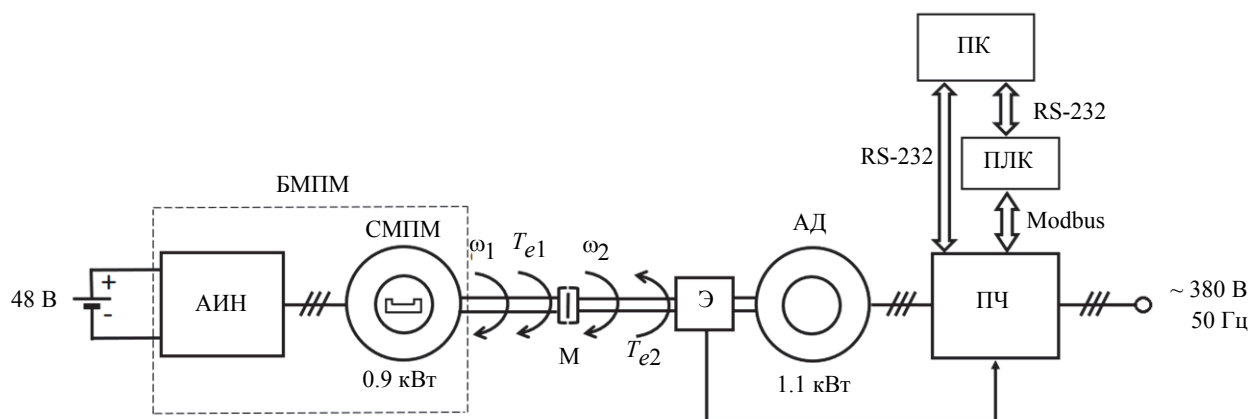


Рис. 1

Параметры, приведенные в табл. 1, используются при проведении автоматической настройки ПЧ с помощью программы CX-Drive [12].

**Математическое описание механического движения бесконтактной машины постоянно-го тока, нагружаемой асинхронной машиной.** БМПП с АД составляют механически связанную систему. АД создает нагрузочный момент для БМПП. Валы БМПП и АД вращаются с одинаковой скоростью, так как они жестко соединены друг с другом с помощью кулачковой муфты.

Если пренебречь силой трения, то можно записать уравнение механического движения асинхронного двигателя [13]:

$$T_{H1} = T_{e1} - J_1 \frac{d\omega_1}{dt}, \quad (1)$$

где  $T_{e1}$  – электромагнитный момент БМПП;  $T_{H1}$  – момент нагрузки на валу БМПП;  $J_1$  – момент инерции ротора БМПП;  $\omega_1$  – скорость вращения ротора БМПП.

Аналогично можно записать уравнение механического движения БМПП [11]:

$$T_{H2} = T_{e2} - J_2 \frac{d\omega_2}{dt}, \quad (2)$$

где  $T_{e2}$  – электромагнитный момент АД;  $T_{H2}$  – момент нагрузки на валу АД;  $J_2$  – момент инерции АД;  $\omega_2$  – скорость вращения ротора АД.

При жестком соединении валов угловые скорости равны по модулю, а моменты нагрузки равны и противоположны по знаку:  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ ,  $T_{H1} = -T_{H2}$ . Приравнивая правые части уравнений (1) и (2) получаем уравнение механического равновесия системы:

$$T_{e1} = T_{e2} + \frac{d\omega}{dt}(J_1 + J_2). \quad (3)$$

При  $T_{e1} > T_{e2}$  направление вращения АД будет соответствовать направлению вращения БМПП. Из уравнения механического равновесия (3) можно выразить общую скорость вращения системы:

$$\omega = \frac{1}{J_1 + J_2} \int (T_{e2} - T_{e1}) dt. \quad (4)$$

Система будет иметь общий момент инерции, равный сумме моментов инерции роторов АД и БМПП, а направление вращения системы соответствует направлению наибольшего электромагнитного момента.

**Автоматическая настройка преобразователя частоты, питающего асинхронный двигатель.** Перед переводом ПЧ в режим управления моментом необходимо провести автоматическую настройку ПЧ [13]. Автонастройку можно провести с вращением или без вращения вала асинхронного двигателя. При проведении автонастройки без вращения вала точность определения параметров АД будет ниже, поэтому в данной статье описывается автонастройка с вращением вала.

Ввод параметров ПЧ производился с помощью программного пакета CX-Drive.

Для автонастройки системы «ПЧ-АД» необходимо выполнить следующие шаги:

1. Убедиться в отсутствии нагрузки на валу АД. Убедиться в том, что на вход ПЧ поступают сигналы от энкодера (подключение кабеля, соединяющего энкодер с ПЧ).

2. Подключить компьютер (ПК) с установленной на нем программой CX-Drive к ПЧ.

3. Открыть программу CX-Drive и установить логическое соединение с ПЧ.

4. Выбрать в CX-Drive опцию [Parameters Editor].

5. Перевести ПЧ в режим векторного управления (Flux Vector), для чего параметр A1-02 установить равным 3.

6. Выбрать опцию [Auto-Tuning].

7. Ввести параметры автонастройки, показанные в табл. 1.

8. После ввода параметров запустить процесс автонастройки нажатием в CX-Drive на кнопку [Start]. В процессе автонастройки ПЧ автоматически идентифицирует параметры подключенного к нему асинхронного двигателя.

9. После завершения процесса автонастройки ПЧ сохраняет найденные параметры (табл. 2).

В табл. 2 приведены основные параметры, выдаваемые программой CX-Drive в результате автонастройки: Base Voltage – напряжение двигателя; Motor Rated Current – номинальный ток двигателя; Motor Rated Slip – номинальное значение скольжения; Motor No Load Current – ток холостого хода; Number of Motor Poles – число полюсов; Motor Line-to-Line Resistance – межфазное активное сопротивление; Motor Leak Inductance – индуктивность рассеяния; Motor Rated Output – номинальная выходная мощность (мощность на валу); PG Rotation Selection – выбор режима автонастройки с вращением вала или без вращения

Таблица 2

Код параметра в меню ПЧ	Параметр	Результат автонастройки	Значение по умолчанию	Допустимый диапазон	Единицы измерения
E1-13	Базовое напряжение	255.5	400.0	0.0 to 510.0	В
E2-01	Номинальный ток двигателя	2.76	3.10	0.37 to 7.40	А
E2-02	Номинальное скольжение двигателя	3.51	2.50	0.0 to 20.0	Гц
E2-03	Ток холостого хода двигателя	1.12	1.4	0.0 to 2.75	А
E2-04	Количество полюсов двигателя	4	4	2 to 48	–
E2-05	Сопротивление двигателя от линии к линии	13.754	10.1	0.0 to 65.00	Ом
E2-06	Индуктивность утечки двигателя	20.6	18.3	0.0 to 40.00	%
E2-11	Номинальная мощность двигателя	1.1	1.5	0.0 to 650.00	кВт
F1-05	Выбор поворота PG	1: Фаза В – команда прямого запуска	0	0 to 1	–
T1-07	Базовая скорость двигателя	142,2	175	0 to 2400	рад/с
T1-08	Количество импульсов PG	4096	1024	0 to 60000	–

вала; Motor Base Speed – базовая частота вращения двигателя; Number of PG Pulses – количество импульсов датчика положения (энкодера) на один оборот.

Верификация полученных в результате автонастройки ПЧ параметров АД производится сравнением полученных параметров с паспортными данными АД ST80LB [11]. Полученное в результате автонастройки значение межфазного сопротивления составляет 13.754 Ом (табл. 2). Это примерно соответствует приведенному в паспортных данных значению фазного сопротивления 7.033 Ом [11]. Удвоение фазного сопротивления дает значение 14.07 Ом. Различие между идентифицированным значением и паспортными данными составляет 0.32 Ом и объясняется наличием сопротивления соединительного кабеля, имеющего длину более 2 м, и разбросом параметров асинхронной машины. Номинальное значение тока, найденное при автоматической идентификации (табл. 2), составляет 2.76 А, что близко к номинальному значению в 2.8 А, приведенному в паспортных данных [11].

**Перевод преобразователя частоты в режим управления моментом.** После проведения автонастройки или ввода параметров, полученных в результате заранее проведенной автонастройки, необходимо изменить параметры ПЧ для его перевода в режим управления моментом.

Перевод ПЧ в режим управления моментом осуществляется установкой параметра d5-01 в 1: d5-01 = 1.

Формирование задания момента для нагрузочного асинхронного двигателя в ПЧ осуществляется в соответствии со структурной схемой, показанной на рис. 2.

Регулирование вращающего момента асинхронного двигателя происходит с помощью задания момента на аналоговом входе ПЧ при наличии опции векторного управления.

Аналоговый вход преобразователя частоты А1 используется для задания момента в аналоговом виде от внешнего управляющего устройства (например, от программируемого логического контроллера ПЛК). Для ввода задания момента (опорного момента) можно использовать сигнал аналогового напряжения или тока, как показано в табл. 3 ([10]). Выбор диапазона сигнала и аналоговой величины (ток или напряжение) производится с помощью пары параметров H3-08, H3-09.

Поскольку предполагается изменение направления момента, используем двухполярный сигнал (–10...+10 В). Для выбора в качестве опорного сигнала момента аналогового двухполярного сигнала (–10...+10 В) и назначения его на вход А2 преобразователя необходимо установить параметры H3-08 = 1, H3-09 = 13 (табл. 4).

Для предотвращения роста скорости вращения ротора свыше установленного предусматривается ограничение скорости. Значение предельной скорости задается с помощью параметра d5-04 или с помощью аналогового сигнала (–10...+10 В), как видно из табл. 4 [10].

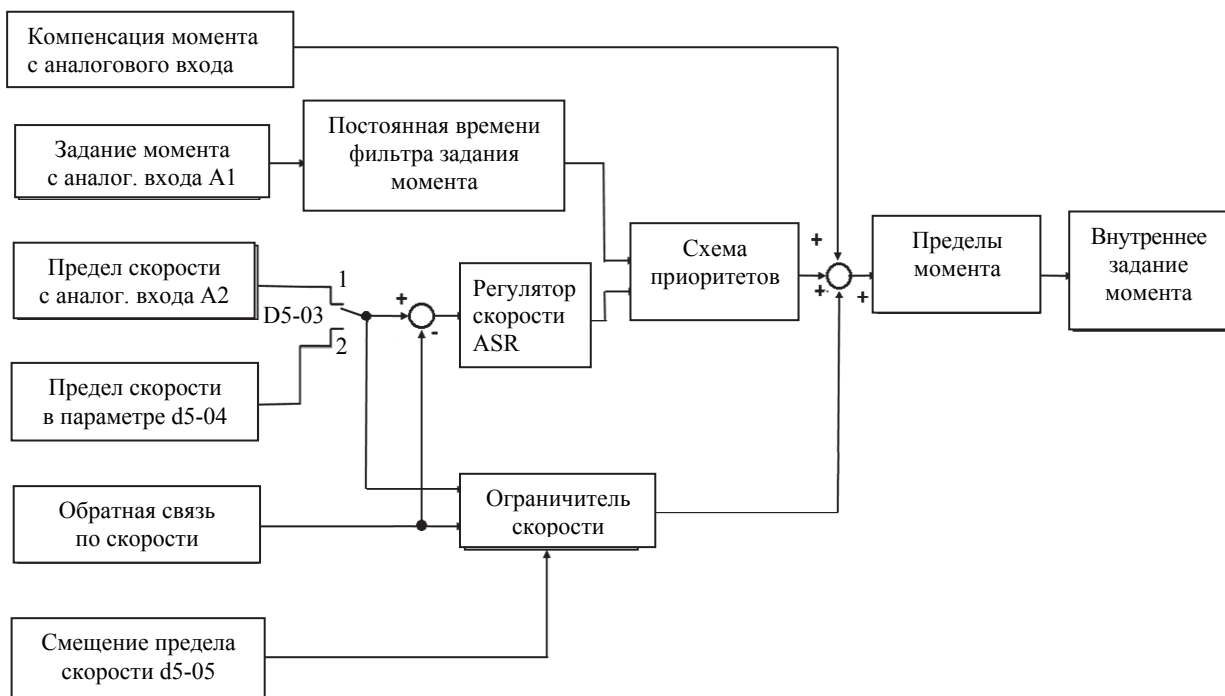


Рис. 2

Таблица 3

Способ ввода задания момента	Источник опорного сигнала	Настройка параметров	Примечания
Вход по напряжению (0...10 В)	Аналоговый вход А2	H3-08 = 0 H3-09 = 13	Для выбора положительного или отрицательного момента использовать дискретный вход (H1- = 78)
Вход по напряжению (-10...+10 В)	Аналоговый вход А2	H3-08 = 1 H3-09 = 13	Направление опорного момента зависит от полярности напряжения на аналоговом входе
Токовый вход (4...20 мА)	Аналоговый вход А2	H3-08 = 2 H3-09 = 13	Для выбора положительного или отрицательного момента использовать дискретный вход (H1- = 78)

Таблица 4

Способ ввода предельной скорости	Источник опорного сигнала	Настройка параметров	Примечания
С помощью параметра	Параметр d5-04	d5-03 = 2	-
Входное напряжение (0...+10 В)	Аналоговый вход А1	b1-01 = 1 H3-01 = 0	Эти значения используются при предельной скорости, которая должна всегда быть положительной
Входное напряжение (-10 ...+10 В)	Аналоговый вход А1	b1-01 = 1 H3-01 = 1	Эти значения используются, если ограничение скорости применяется в обоих направлениях
Входной ток (4...20 мА)	Аналоговый вход А2	b1-01 = 1 H3-08 = 2 H3-09 = 13 H3-13 = 1	Клемма А1 становится источником значения опорного вращающего момента. Переключатель 2 DIP-переключателя S1 на клеммной плате должен быть переведен в положение ВКЛ (сторона I)
Дополнительная карта (AI-14В) (0 ± 10 В)	Канал 1	b1-01 = 1 F2-01 = 0	Аналоговый вход А1 замещается каналом 1 карты AI-14В
	Каналы 1–3	b1-01 = 3 F2-01 = 1	В качестве предельной скорости принимается сумма каналов 1–3



Для ввода ограничения на скорость в обоих направлениях необходимо установить следующие параметры:  $d5-03 = 1$ ,  $B1-01 = 1$ ,  $H3-01 = 1$ .

Постоянная времени фильтра опорного вращающего момента настраивается с помощью параметра  $d5-02$ . Увеличение значения постоянной времени предотвращает возможные колебания, но замедляет отклик системы на сигнал задания момента, поэтому оставляем заводскую настройку параметра постоянной времени  $d5-02 = 0$ .

В структурной схеме формирования опорного момента предусматривается блок автоматического регулятора скорости «ASR», который представляет собой ПИ-регулятор. Переключение между требуемыми значениями интегральной и пропорциональной части осуществляется автоматически, используя параметр  $C5-07$ , либо с помощью внешнего сигнала. В данном случае для достижения требуемых переходных процессов при работе двигателя на разных скоростях следует установить параметр  $C5-07 = 0$ .

Для выбора источника опорного момента (аналогового входа или выходного сигнала «ASR») предусматривается схема приоритета. Для использования выхода «ASR» в качестве источника сигнала формирования момента следует установить параметр  $H2-02 = 32$ .

Рассмотрена концепция построения бездатчикового нагрузочного стенда для бесконтактного двигателя постоянного тока с использованием асинхронного двигателя, питающегося от промышленного преобразователя частоты с векторным управлением и возможностью управления моментом. Рассмотрена настройка преобразователя частоты с векторным управлением для перевода преобразователя в режим управления моментом. Проверена практическая применимость процедуры автоматической настройки преобразователя частоты в режиме управления моментом для идентификации параметров асинхронного двигателя. Полученные в результате идентификации параметры близки к данным, приведенным в паспорте асинхронной машины.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alnasir Z. A., Almarhoon A. H. Design of Direct Torque Controller of Induction Motor (DTC) // Intern. J. of Engineering and Technology (IJET). 2012. Vol. 4. P. 54–70.
2. Design and Optimization of BLDC Generator for Wind Turbine Applications / S. M. M. Mertalaei, B. Abdi, K. Shaloudegi, R. Ghasemi // Intern. Review on Modelling and Simulations (I.RE.MO.S.). 2012. Vol. 5. P. 899–904.
3. ГОСТ ISO 9000–2011. Издания. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь; введ. 2013-01-01. М.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2011. 24 с.
4. ГОСТ Р 52776-2007. Издания. Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики; введ. 2008-01-01. М.: Стандартинформ, 2008. 66 с.
5. Татаринцев Н. И., Грушевский И. А. Функция управления моментом в асинхронных электроприводах // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 8. С. 51–56.
6. Leoš B., Martin D. Indirect Torque Measurement Using Industrial Vector Control Frequency Converter // IEEE Intern. Carpathian Control Conf. 2016. Vol. 17. P. 48–53.
7. Martin D., Leoš B. On The Accuracy Of Indirect Torque Measurement Using Frequency Converter // Intern. Carpathian Control Conf. (ICCC). 2017. Vol. 18. P. 28–33.
8. Accuracy study of frequency converter estimates used in the sensorless diagnostics of induction-motor-driven systems / A. Tero, T. Jussi, A. Jero, N. Markku // IEEE European Conf. on Power Electronics and Applications. 2011. Vol. 14. P. 1–10.
9. Estimation accuracy of a vector-controlled frequency converter used in the determination of the pump system operating state / A. Tero, T. Jussi, N. Lauri, A. Cosme, M. Azuara, N. Markku // IEEE European Conf. on Power Electronics and Applications. 2013. Vol. 15. P. 1–10.
10. Varispeed F7. Vector Control Frequency Inverter. User's Manual. Cat. № TOE-S616-55.2-OY. URL: YASKAWA/Omron. URL: <http://www.rakurs.ru/> (дата обращения 29.10.2020)
11. Асинхронные сервомоторы ST. Руководство по использованию. ЗАО «Сервотехника», 2011. URL: <http://www.servotechnica.ru/files/doc/documents/file-1127.pdf> (дата обращения 09.11.2020)
12. CX-Drive. Operation manual. Cat. No. W453-E1-05 Rev. June 2007 OMRON Corporation. URL: [https://asest.omron.eu/downloads/manual/en/v3/w453\\_cx-drive\\_operation\\_manual\\_en.pdf](https://asest.omron.eu/downloads/manual/en/v3/w453_cx-drive_operation_manual_en.pdf). (дата обращения 02.10.2020)
13. Extended Algorithm of Electrical Parameters Identification via Frequency Response Analysis / E. Samygina, M. Tiapkin, L. Rassudov, A. Balkovoi // 26th Intern. Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED), Russia, Moscow, 2019. P. 1–4.

F. Sh. Al-Mahturi, D. V. Samokhvalov, A. I. Jaber, N. I. Tatarintsev  
*Saint Petersburg Electrotechnical University*

## A TEST BENCH FOR SENSORLESS CONTROL OF THE LOAD TORQUE OF A BRUSHLESS DC MACHINE

*The concept of constructing a load stand for a brushless DC motor using an induction motor fed by an industrial frequency converter with vector control and the possibility of torque control was considered. This eliminates the use of a torque sensor, reduces the cost of the system and simplifies the design of the electromechanical part of the test-bench. It should be noted that this stand can also be used to study the characteristics of a brushless DC motor when operating in generator mode, in contrast to the torque sensor, which cannot be used as a drive motor. In the first part, a mathematical model of the mechanical part of the system of a brushless DC motor loaded by a vector-driven asynchronous machine is derived. In the second part, automatic tuning is performed to determine the parameters of the ST80LB type induction motor required to put the FZ6 type frequency converter into direct torque control mode. At the end of this article, the frequency converter with vector control is transferred to the direct torque control mode. The procedure for automatic tuning and transfer the frequency converter to direct torque control mode can also be useful as a guideline for the «Racurs» Laboratory.*

**Brushless DC motor, load test-bench, automatic tuning, torque control, load torque, asynchronous motor**

---