УДК 621.313.333
2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами



М.Ю. Пустоветов
Донской государственный технический университет

РАСЧЕТНЫЕ ОТКЛОНЕНИЯ НОМИНАЛЬНОГО МОМЕНТА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ 4А СО СТЕПЕНЬЮ ЗАЩИТЫ IP23

В статье для двигателей серии 4А со степенью защиты IP23 рассчитаны отклонения вращающего момента в номинальном режиме, получаемые при расчете на основе параметров Т-образной схемы замещения, от опытного значения, вычисляемого на основе каталожных данных мощности на валу и частоты вращения.

Трехфазный асинхронный двигатель, степень защиты IP23, вращающий момент, номинальный режим, отклонение.

Трехфазные асинхронные двигатели (АД) являются самым распространенным типом электрических машин, применяемым в широком диапазоне мощностей во всех отраслях народного хозяйства, включая нефтяную [1] и газовую [2] промышленность, машиностроение [3], железнодорожный транспорт [4], сельское хозяйство [5]. АД являются основой многих электроприводов, включая автоматизированные.

Исследование режимов работы АД, в том числе в составе систем автоматического управления технологическими процессами, часто выполняется с использованием компьютерного моделирования. Ряд математических моделей АД построены на основе Т-образной схемы замещения (СЗ) [1, 3, 4, 6–13] (рис. 1).

Общепромышленные АД применяются наиболее широко. Но далеко не для всех их типов опубликованы значения параметров СЗ (активных сопротивлений и индуктивностей), которые необходимы для адекватного функционирования математической модели. Проблема получения параметров СЗ на основании доступных каталожных данных АД давно и хорошо известна. Попытки ее решения с тем или иным приближением регулярно предпринимаются различными специалистами [5, 14–21].

Актуальность настоящего исследования основана на факте, что наиболее полными доступными для использования параметрами СЗ характеризуется отечественная серия АД 4А. Параметры опубликованы в [22] для упрощенной Г-образной СЗ (рис. 2) в относительных единицах. Способ перехода к Т-образной СЗ за счет пересчета параметров АД с использованием методов теории электрических цепей подробно описан в [23, 24].

Как правило, адекватность математической модели АД, то есть адекватность рассчитанных параметров Т-образной СЗ, проверяют, сравнивая расчетный момент на валу с опытным при известной частоте вращения ротора.

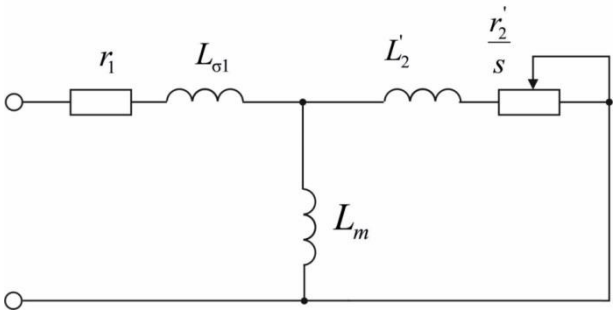


Рис. 1. Т-образная СЗ АД

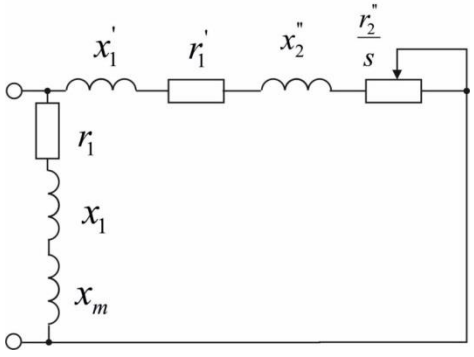


Рис. 2. Упрощенная Г-образная СЗ АД [22]

Рассчитаем номинальный момент $M_{\text{ном}}$ на валу АД на основании каталожного значения номинальной мощности на валу $P_{2\text{ном}}$ при номинальной частоте вращения $\omega_{\text{ном}}$, рад/с, или $n_{2\text{ном}}$, об/мин [25], подразумевая, что АД развивает его при расчетной рабочей температуре обмоток.

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{2\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{P_{2\text{ном}}}{n_{2\text{ном}} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60}}. \quad (1)$$

Полученное по (1) значение момента примем за базисное.

Далее рассчитаем номинальный момент на валу АД, используя рассчитанные значения параметров Т-образной СЗ. Вычисление номинального момента [26] следует производить при расчетной рабочей температуре обмоток АД, т.е. домножив r_1 (активное сопротивление фазы статора) и r_2' (активное сопротивление фазы ротора, приведенное к статору) на m_T (коэффициент приведения активного сопротивления к расчетной рабочей температуре) [27]. Для классов изоляции *F* и *H* m_T = 1,38.

$$M_{\text{ном}} = \frac{3 \cdot p \cdot U_{\text{фном}}^2 \cdot \frac{r_2' \cdot m_T}{s_{\text{ном}}}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \left[\left(r_1 \cdot m_T + \left(1 + \frac{x_{\sigma 1}}{x_m}\right) \cdot \frac{r_2' \cdot m_T}{s_{\text{ном}}} \right)^2 + \left(x_{\sigma 1} + \left(1 + \frac{x_{\sigma 1}}{x_m}\right) \cdot x_2' \right)^2 \right]}. \quad (2)$$

Остальные обозначения в (2) те же, что в [23, 24], а именно: $U_{\text{фном}}$ – действующее значение фазного напряжения статора; f – частота напряжения статора; $s_{\text{ном}}$ – скольжение ротора в номинальном режиме; p – число пар полюсов; $x_{\sigma 1}$ – индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора; x_2' – индуктивное сопротивление рассеяния фазы ротора, приведенное к статору; x_m – главное индуктивное сопротивление.

Из [22] следует, что в серии 4А для АД с высотами оси вращения (160 … 355) мм используется изоляция класса *F*. Все АД серии 4А со степенью защиты IP23 имеют высоту оси вращения в пределах (160 … 355) мм.

Для АД серии 4А со степенью защиты IP44 анализ отклонений вращающего момента, рассчитанного по (2), от базисного (опытного) опубликован автором в [24]. В данной работе аналогичное сравнение проводится для АД со степенью защиты IP23 – в этом заключается **научная новизна**.

Практическая значимость работы заключается в возможности оценки по полученным результатам применимости каталожных данных, параметров СЗ конкретного АД для моделирования того или иного электропривода. Либо расчетные параметры СЗ годны, либо требуется их уточнение – решение в компетенции специалиста, осуществляющего моделирование и представляющего, какая точность расчетов допустима в конкретном случае.

Результаты сравнения показаны на рисунках 3–8 в функции номинальной мощности на валу АД. Оказалось, что расчетный момент на валу может отклоняться от опытного до 34 %.

Для некоторых типоразмеров АД (табл.) отклонение расчетного номинального момента на валу от опытного получилось меньшим при условии использования значений сопротивлений СЗ при температуре 20 ºС, а не при рабочей температуре обмоток. В то же время для остальных типоразмеров АД отклонение момента с учетом нагрева обмоток ожидаемо превысило отклонение, вычисленное без учета нагрева обмоток.

На рисунках 3–6 для большей наглядности горизонтальная ось представлена в логарифмическом масштабе.

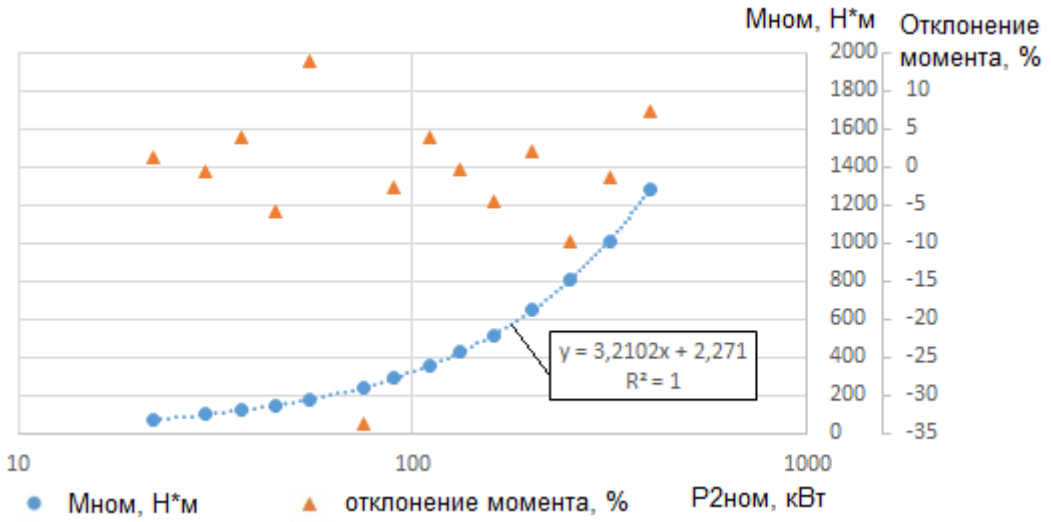


Рис. 3. Сравнение результатов расчета номинального момента, полученных по (2), с базисным значением по (1) для 2-полюсных АД по таблице 2.2 [22]

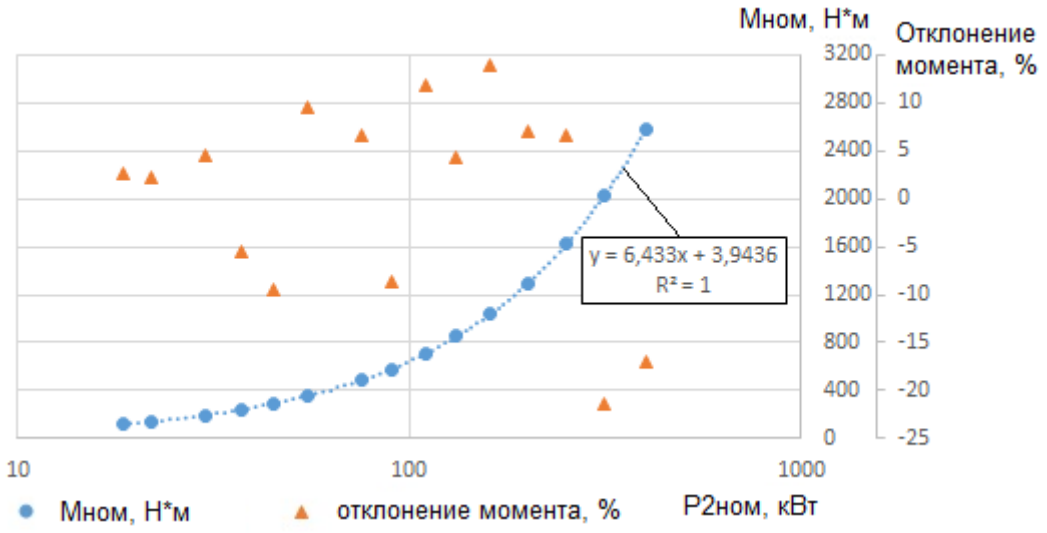


Рис. 4. Сравнение результатов расчета номинального момента, полученных по (2), с базисным значением по (1) для 4-полюсных АД по таблице 2.2 [22]

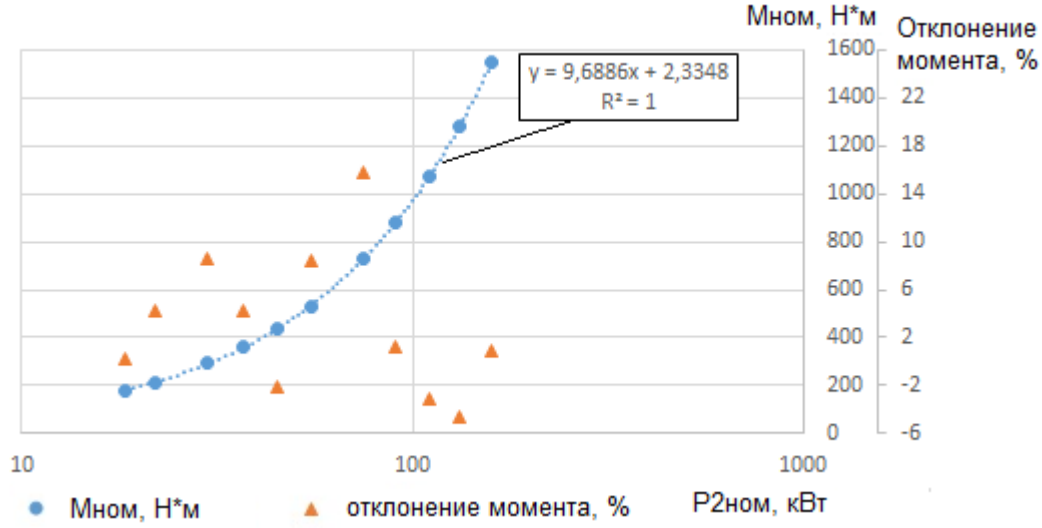


Рис. 5. Сравнение результатов расчета номинального момента, полученных по (2), с базисным значением по (1) для 6-полюсных АД по таблице 2.2 [22]

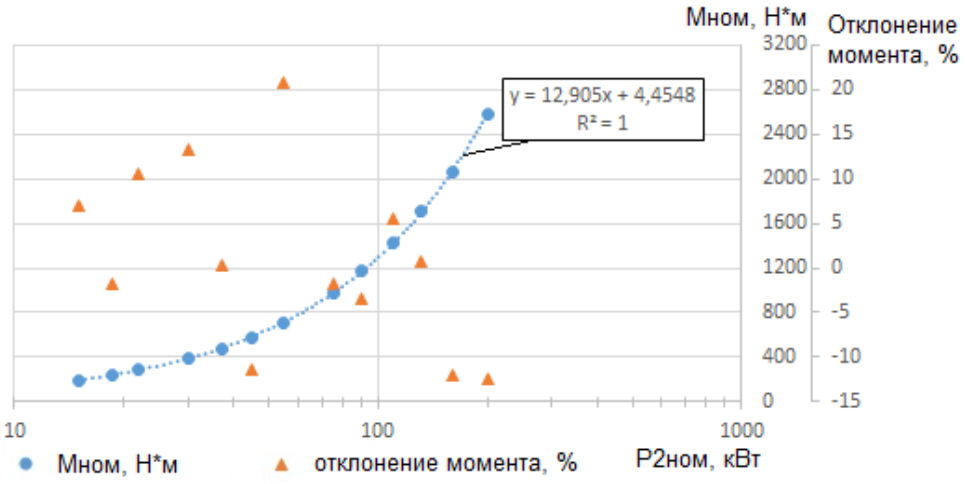


Рис. 6. Сравнение результатов расчета номинального момента, полученных по (2), с базисным значением по (1) для 8-полюсных АД по таблице 2.2 [22]

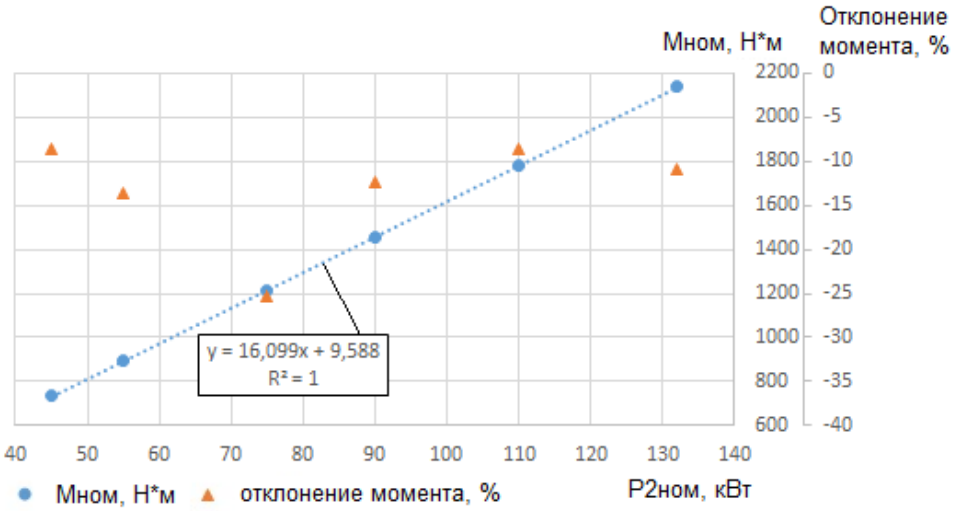


Рис. 7. Сравнение результатов расчета номинального момента, полученных по (2), с базисным значением по (1) для 10-полюсных АД по таблице 2.2 [22]

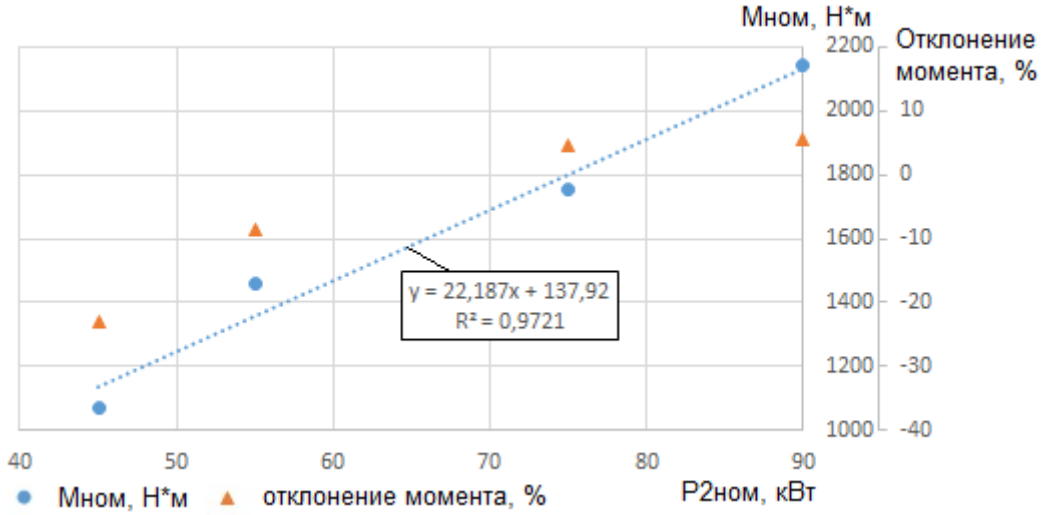


Рис. 8. Сравнение результатов расчета номинального момента, полученных по (2), с базисным значением по (1) для 12-полюсных АД по таблице 2.2 [22]

Таблица

Сравнение отклонений расчетного момента на валу от опытного в номинальном режиме

Типоразмер АД	Отклонение расчетного момента на валу от опытного в номинальном режиме, %	
	При учете нагрева обмоток	Без учета нагрева обмоток
4АН200L2У3	-33,9	-10,2
4АН355S4У3	-21,4	5,5
4АН355M4У3	-17,0	-11,1
4АН315S10У3	-25,3	-0,6
4АН315S12У3	-23,1	0,3

Выводы

Так же, как и в [23, 24], для АД со степенью защиты IP23, даже такой содержательный набор исходных данных, который имеется для серии 4А, не гарантирует для любого типоразмера АД в составе серии хорошее совпадение расчетного момента на валу с опытным значением в номинальном режиме.

Литература

1. Грачева, Е. И. Исследование влияния пуска электропривода нефтеперекачивающих насосов на работу скважинной насосной установки с цепным приводом / Е. И. Грачева, Т. В. Табачникова, А. С. Чернышёв // Промышленная энергетика. – 2022. – № 4. – С. 51–59.

2. Новые технологии и современное оборудование в электроэнергетике газовой промышленности / И. В. Белоусенко, Г. Р. Шварц, С. Н. Великий [и др.]. – Москва : ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. – 300 с.

3. Кузовкин, В. А. Методика моделирования исполнительных двигателей переменного тока следящих электроприводов механообрабатывающего оборудо-

вания / В. А. Кузовкин, В. В. Филатов // Вестник МГТУ «Станкин». – 2011. – № 1 (13). – С. 113–119.

4. Пустоветов, М. Ю. Математическое моделирование асинхронного вспомогательного электродвигателя АЭ92-4 электровоза переменного тока / М. Ю. Пустоветов, А. В. Чубукин // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» (Иркутск, апрель 2017 г.). – Иркутск : ИРНИТУ, 2017. – Т. 1. – С. 366–369.

5. Еремочкин, С. Ю. К вопросу выбора достоверного метода расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя / С. Ю. Еремочкин, Д. В. Дорохов, А. А. Жуков // Вестник НГИЭИ. – 2022. – № 12 (139). – С. 43–53.

6. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – Москва : ДМК Пресс, 2012. – 288 с. (Серия «Проектирование»).

7. Кузовкин, В. А. Моделирование процессов управления асинхронным электродвигателем / В. А. Кузовкин, В. В. Филатов // Вестник МГТУ «Станкин». – 2008. – № 2. – С. 107–116.

8. Чумаев, Д. А. Разработка имитационной динамической модели трехфазного асинхронного электродвигателя / Д. А. Чумаев, В. В. Филатов // Вестник МГТУ «Станкин». – 2009. – № 4 (8). – С. 89–95.

9. Автоматизированный расчет асинхронного двигателя / В. А. Кубарев, И. Ю. Поползин, Д. А. Маршев [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 5. – С. 354–361.

10. Островлянчик, В. Ю. Модель асинхронного двигателя для бездатчиковых информационно-управляющих систем автоматизированного электропривода / В. Ю. Островлянчик, И. Ю. Поползин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2016. – №1 (113). – С. 111–120.

11. Ковалев, В. Н. Механическая мощность асинхронных двигателей при несинусоидальном питании / В. Н. Ковалев, Ю. В. Ковалева // Проблемы региональной энергетики. – 2025. – № 2 (66). – С. 10–17.

12. Дзюин, Д. В. Разработка программы расчета параметров схемы замещения трехфазного асинхронного электродвигателя / Д. В. Дзюин, В. В. Дмитриева // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2024. – № 3 (25). – С. 84–92.

13. Соколовский, Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием : учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г. Г. Соколовский. – Москва : Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.

14. Фираго, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Мн.: Техноперспектива, 2006. – 363 с.

15. Пустоветов, М. Ю. Компьютерное моделирование асинхронных двигателей и трансформаторов. Примеры взаимодействия с силовыми электронными преобразователями / М. Ю. Пустоветов, К. П. Солтус, И. В. Синявский // Saarbrucken : Германия : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 209 с.

16. Марков, В. А. Определение параметров и характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором / В. А. Марков // МГОУ-XXI-Новые технологии. – 2002. – № 1. – С. 42-46.

17. Донской, Н. В. Определение параметров асинхронных двигателей по паспортным данным и пусковым характеристикам / Н. В. Донской // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012 (Иваново, октябрь 2012 г.). – Иваново : ИГЭУ, 2012. – С. 201–205.

18. Гридин, В. М. Расчет параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным / В. М. Гридин // Электричество. – 2012. – № 5. – С. 40–44.

19. Макеев, М. С. Алгоритм расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным / М. С. Макеев, А. А. Кувшинов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2013. – № 1 (23). – С. 108–112.

20. Осипов, В. С. К определению параметров эквивалентной схемы замещения трехфазных асинхронных электродвигателей / В. С. Осипов // Электротехника. – 2017. – № 12. – С. 83–87.

21. Прищепов, М. А. К вопросу о расчете параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным / М. А. Прищепов // Агропанорама. – 2021. – № 3 (145). – С. 23–27.

22. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская – Москва : Энергоиздат, 1982. – 504 с.

23. Пустоветов, М. Ю. Алгоритм расчета параметров Т-образной схемы замещения асинхронных двигателей серии 4А на основе параметров Г-образной схемы замещения / М. Ю. Пустоветов // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. Материалы I Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию ФГБОУ ВО «ГГНТУ им. акад. М. Д. Миллионщикова» (Грозный, 02–04 ноября 2017 г.) : в 2 томах. – Грозный : ФГБОУ ВО «ГГНТУ», 2017. – Т. 1. – С. 157–160.

24. Пустоветов, М. Ю. Способ расчета параметров Т-образной схемы замещения асинхронных двигателей серии 4А по данным Г-образной / М. Ю. Пустоветов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2026. – № 1 (256). – С. 4–13.

25. Алиев, И. И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию : учеб. пособие для вузов / И. И. Алиев. – 2-е изд., доп. – Москва : Высшая школа, 2000. – 255 с.

26. Вольдек, А. И. Электрические машины : учебник для студентов высших технических учебных заведений / А. И. Вольдек. – 2-е изд, перераб. и доп. / А. И. Вольдек. – Ленинград : Энергия, 1974. – 840 с.

27. Гольдберг, О. Д. Проектирование электрических машин : учеб. для втузов / О. Д. Гольдберг, Я. С. Гурин, И. С. Свириденко ; под редакцией О. Д. Гольдберга. 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 2001. – 430 с.

M.Yu. Pustovetov
Don State Technical University

ESTIMATED DEVIATIONS OF RATED TORQUE OF SERIES 4A INDUCTION MOTORS WITH IP23 PROTECTION CLASS

In this article, for 4A series induction motors with IP23 protection class, the deviations of the torque at the rated mode, obtained by calculation based on the parameters of the T-shaped equivalent circuit, from the experimental value calculated based on the catalog data for shaft power and rotation speed, are calculated.

Three-phase induction motor, IP23 protection class, torque, rated mode, deviation.