

УДК 621.313.33:004

К ВОПРОСУ О РАСЧЕТЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПО КАТАЛОЖНЫМ ДАННЫМ

М.А. Прищепов,

профессор каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ, докт. техн. наук, доцент

В статье проведен анализ методик расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя и влияния на точность определения параметров схемы замещения тока холостого хода двигателя. Предложен алгоритм итерационного метода расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя, обладающий высокой точностью.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, схема замещения, параметры, алгоритм расчета.

The article analyzes the methods for calculating the parameters of the asynchronous motor replacement and the influence of the idling current on the accuracy of determining the parameters of the replacement circuit. An algorithm of the iterative method for calculating the parameters of the asynchronous motor replacement with high accuracy is proposed.

Key words: asynchronous motor, substitution scheme, parameters, calculation algorithm.

Введение

Определение параметров схемы замещения (СЗ) асинхронного двигателя (АД) в настоящее время актуально, так как в справочной литературе и каталогах для АД новых серий, как правило, отсутствуют параметры СЗ, без которых невозможен расчет их механических и электромеханических характеристик, что затрудняет разработку и проектирование современных регулируемых электроприводов (ЭП). При этом из существующего разнообразия СЗ АД наиболее часто используются Т-образные схемы, как обеспечивающие наилучшую адекватность математического описания электрических, электромагнитных и электромеханических процессов, происходящих в реальном АД. Из существующего многообразия подходов к определению параметров Т-образной СЗ АД каждый из них дает определенную точность определения параметров СЗ.

Цель работы – проанализировать существующие методики определения параметров СЗ АД, предложить наиболее приемлемую методику и дать оценку их использования, исходя из корректности применения и точности определения параметров СЗ.

Основная часть

Известные методики расчета параметров СЗ [1-7] можно разделить на две группы: группа итерационных методик, требующая многократных уточняющих вычислений определенных параметров, и группа безитерационных методик, не требующая многократных уточняющих вычислений.

В работе [1] предложена итерационная методика расчета параметров СЗ АД. При этом на каждой итерации назначается коэффициент загрузки АД, соответствующий максимуму коэффициента полезного действия АД, и коэффициенты выражений добавочных и механических потерь. Затем рассчитываются значения номинального электромагнитного момента

и электромагнитный момент при номинальном скольжении, после чего определяется относительная погрешность несовпадения их значений. Если найденная погрешность превышает допустимую, то корректируется коэффициент загрузки, а также коэффициенты выражений добавочных и механических потерь, и процесс повторяется. Несмотря на возможность получения расчетных параметров СЗ по данной методике, хорошо совпадающих с проектными, эта методика вызывает определенные трудности в ее использовании из-за сложности организации сходимости итерационного процесса, при одновременном изменении трех вышеуказанных коэффициентов.

В источнике [2] предложена безитерационная методика определения параметров СЗ АД, базирующаяся на решении квадратного уравнения относительно коэффициента β , равного отношению активного сопротивления обмотки статора r_1 к активному приведенному к обмотке статора сопротивлению обмотки ротора r'_2 ($\beta=r_1/r'_2$).

Указанное квадратное уравнение получено из совместного решения и математических преобразований системы основных уравнений АД для режима номинальной нагрузки, векторной диаграммы токов, ЭДС и напряжений, удовлетворяющих этой системе, и выражений для критического момента и критического скольжения. При этом используются паспортные данные двигателя. В расчетах требуется угловая скорость вращающегося магнитного поля статора, коэффициенты мощности и полезного действия для номинальной (100 %) и одной из частичных нагрузок (25 % или 50 %). В данной методике для расчета составляющих квадратного уравнения используется также усредненный коэффициент $\beta=r_1/r'_2$ для АД разноточной номинальной мощности и частоты, значение которого находится в диапазоне 0,6-2,5. Автор рекомендует принимать среднее значение $\beta=1,5$.

При этом, проведенные расчеты для АД с различными номинальными мощностями и частотами вращения показывают, что окончательно полученные значения параметров СЗ будут очень сильно зависеть от предварительно принятого значения коэффициента β . Рассмотренная методика будет давать удовлетворительные результаты не для всех номинальных параметров двигателей. Кроме того, в каталогах новых серий АД отсутствуют данные о коэффициентах мощности и полезного действия для частичной загрузки [7].

В работе [3] предложена также безитерационная методика определения параметров СЗ АД, в значительной степени схожая с методикой [2]. В расчетах этой работы необходимы также значения коэффициента мощности ($\cos \varphi$) и полезного действия (η) при частичной загрузке АД. Данные параметры в работе определяются руководствуясь тем, что современные АД проектируются таким образом, что наибольший коэффициент полезного действия достигается при загрузке на 20-25 % меньше номинальной. Следовательно, при номинальной нагрузке и коэффициенте загрузки 0,75 коэффициенты полезного действия можно принять равными между собой $\eta_n \approx \eta_{0,75}$. В свою очередь, при такой загрузке коэффициент мощности сильно отличается от номинального ($\cos \varphi_n$), поэтому авторами предлагается корректирующая зависимость отношения $\cos \varphi_{0,75} / \cos \varphi_n$ от номинальной мощности двигателя. Как и в предыдущей, в предложенной методике используется усредненный коэффициент $\beta = r_1 / r_2'$. Только здесь его рекомендуется принимать равным 1,3, что для некоторых двигателей дает еще большие различия в результатах расчета, чем в предыдущей методике.

Это же утверждение подтверждается и исследованиями, приведенными в работе [8], где указано, что при использовании в расчетах коэффициента частичной нагрузки, превышающего 50 % от номинального, происходит заметное снижение расчетных значений тока холостого хода, который входит в один из коэффициентов решаемого квадратного уравнения относительно коэффициента β , что в конечном итоге оказывает влияние на точность вычислений.

Методика, предложенная в источнике [4], позиционируется авторами, как безитерационная. При этом коэффициент $\beta = r_1 / r_2'$ изменяют с определенным шагом в интервале 1,15-2,75, после чего рассчитанные параметры проверяют на всех этапах расчета. Расчет продолжают до тех пор, пока все расчетные параметры СЗ в относительных единицах, включая и электромагнитную мощность АД, будут внутри диапазонов, характерных для двигателей. Рассматриваемая методика является итерационной, так как требует многократных вычислений. Данная методика предложена только для АД общепромышленных серий. При проведении расчетов для АД малой мощности и низкой синхронной частоты было установлено, что не все контролируемые расчетные параметры входят в допустимый диапазон при проверке [7].

Определенный интерес представляет наиболее простая и приемлемая для использования в учебном процессе, а также при проведении научно-

исследовательских работ в ЭП безитерационная методика, предложенная в работах [5; 6]. Она также предполагает расчет сначала отношения активного сопротивления обмоток статора к активному приведенному к обмотке статора сопротивлению обмотки ротора, т.е. $\beta = r_1 / r_2'$, а затем расчет самих параметров, т.е. сопротивлений СЗ.

При разработке этой методики расчета параметров СЗ использовалась классическая схема замещения одной фазы АД, известная, например, по работе [9]. В дальнейшем при разработке методики расчета и выводе формул автор основывался на положениях, приведенных в классических работах [9; 10], что делает эту методику общедоступной в понимании и использовании.

Детальный анализ основных, охарактеризованных выше методик, показывает, что все они, кроме первой, изложенной в работе [1], сводятся к определению коэффициента β , равного отношению активного сопротивления статора r_1 к активному, приведенному к обмотке статора сопротивлению обмотки ротора r_2' , тока холостого хода АД, критического скольжения s_k с последующим вычислением остальных параметров СЗ.

При этом во всех методиках априори применяются постоянными определенные коэффициенты в определенном диапазоне значений, что конечно же не способствует повышению точности расчета параметров СЗ. Кроме того, на точность расчета параметров СЗ существенное влияние оказывает точность определения тока холостого хода АД I_0 [8]. Проведенный в этой работе анализ методик расчета тока холостого хода показывает, что ток, определенный по формуле [11]

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{1p}^2 - [I_{1n} \cdot p^* (1 - s_n) / (1 - p^* s_n)]^2}{1 - [p^* (1 - s_n) / (1 - p^* s_n)]^2}}, \quad (1)$$

где I_{1n} , I_{1p}^* – номинальный фазный ток двигателя и ток при частичной нагрузке, А;

p^* – относительная величина загрузки двигателя по мощности;

s_n – номинальное скольжение, можно принимать в качестве базовой, как наиболее точной, по экспертным оценкам специалистов.

При этом надо учитывать, что эта формула справедлива и дает относительно точные результаты, если имеются КПД η_n и коэффициент мощности $\cos \varphi_n$ АД при номинальной нагрузке и частичной, не превышающей 50% от номинальной [8], что не всегда имеется в справочниках и каталогах АД. Использование этой же формулы при частичной нагрузке 75 %, как предложено в методике работы [3], дает заметное снижение значения тока холостого хода I_0 , а соответственно, и снижение точности определения параметров СЗ. Анализ методов расчета тока холостого хода АД I_0 , в работе [8], показывает, что при отсутствии данных по АД при частичной нагрузке менее 50 %, наиболее точным является метод, основанный на балансе реактивной мощности в номинальном режиме по следующей формуле [8; 12]:

$$I_0 = I_{1H} \left(\sin \varphi_H - \frac{1}{k_i} \right), \quad (2)$$

где k_i – кратность пускового тока;

$$\sin \varphi_H = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H}, \quad (3)$$

где $\cos \varphi_H$ – коэффициент мощности АД при номинальной нагрузке.

При этом погрешность расчета I_0 для АД средней мощности составила менее 4 %, а для АД большей мощности результаты расчета практически совпали с проектными [8]. В этой же работе приведено сравнение тока холостого хода АД, полученного по приближенной формуле профессора В.А. Шубенко [13; 14]

$$I_0 = I_{1H} \left(\sin \varphi_H - \frac{s_H \cos \varphi_H}{s_K} \right) =$$

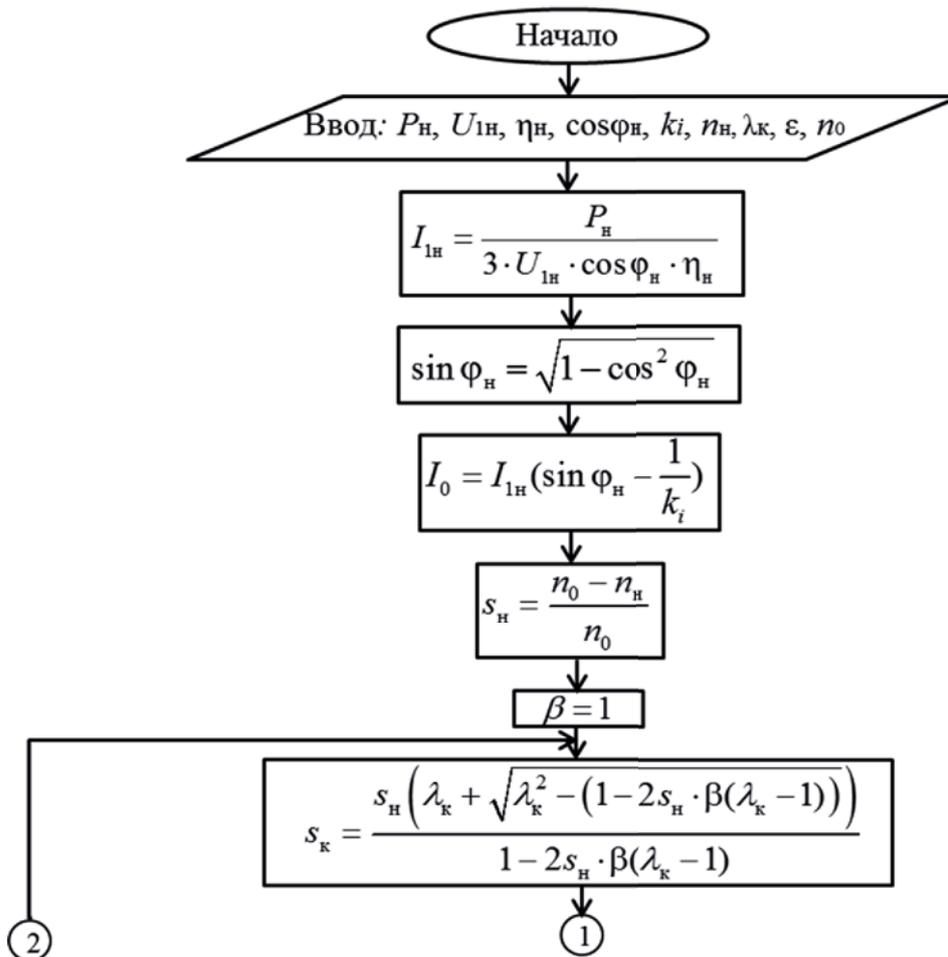
$$= I_{1H} \left(\sin \varphi_H - \frac{\cos \varphi_H}{\lambda_K + \sqrt{\lambda_K^2 - 1}} \right), \quad (4)$$

где s_K – критическое скольжение;
 λ_K – кратность максимального момента.

Погрешность расчета этой формулы превышает 15 %, так как в ней не учитываются потери в стали и на активном сопротивлении статора r_1 . Следовательно, в предлагаемой методике расчета параметров СЗ АД при расчете тока холостого хода I_0 наиболее целесообразно использовать формулу (2), как обеспечивающую наименьшую погрешность при вычислении I_0 по паспортным данным АД. Кроме этого, ввиду того, что во всех методиках, рассмотренных выше, значения определенных коэффициентов принимаются априори, то для повышения точности расчета параметров СЗ необходимо использовать итерации (приближения) для уточнения этих коэффициентов.

При этом необходимо определить с расчетным параметром, по которому будет оцениваться приближение уточняемых коэффициентов. В качестве такого параметра можно использовать критическое скольжение, которое сначала рассчитывается по паспортным данным АД и принятом коэффициенте $\beta = r_1/r_2'$ (s_K), а затем через рассчитанные r_1 , r_2' , номинальное индуктивное сопротивление короткого замыкания X_{KH} и промежуточные переменные A_1 , C_1 , γ (s_{KP}). После сравнения вычисленных скольжений s_K и s_{KP} проводится корректировка коэффициента β в сторону увеличения или уменьшения [15].

Блок-схема алгоритма предложенной методики расчета параметров СЗ АД приведена на рисунке 1.



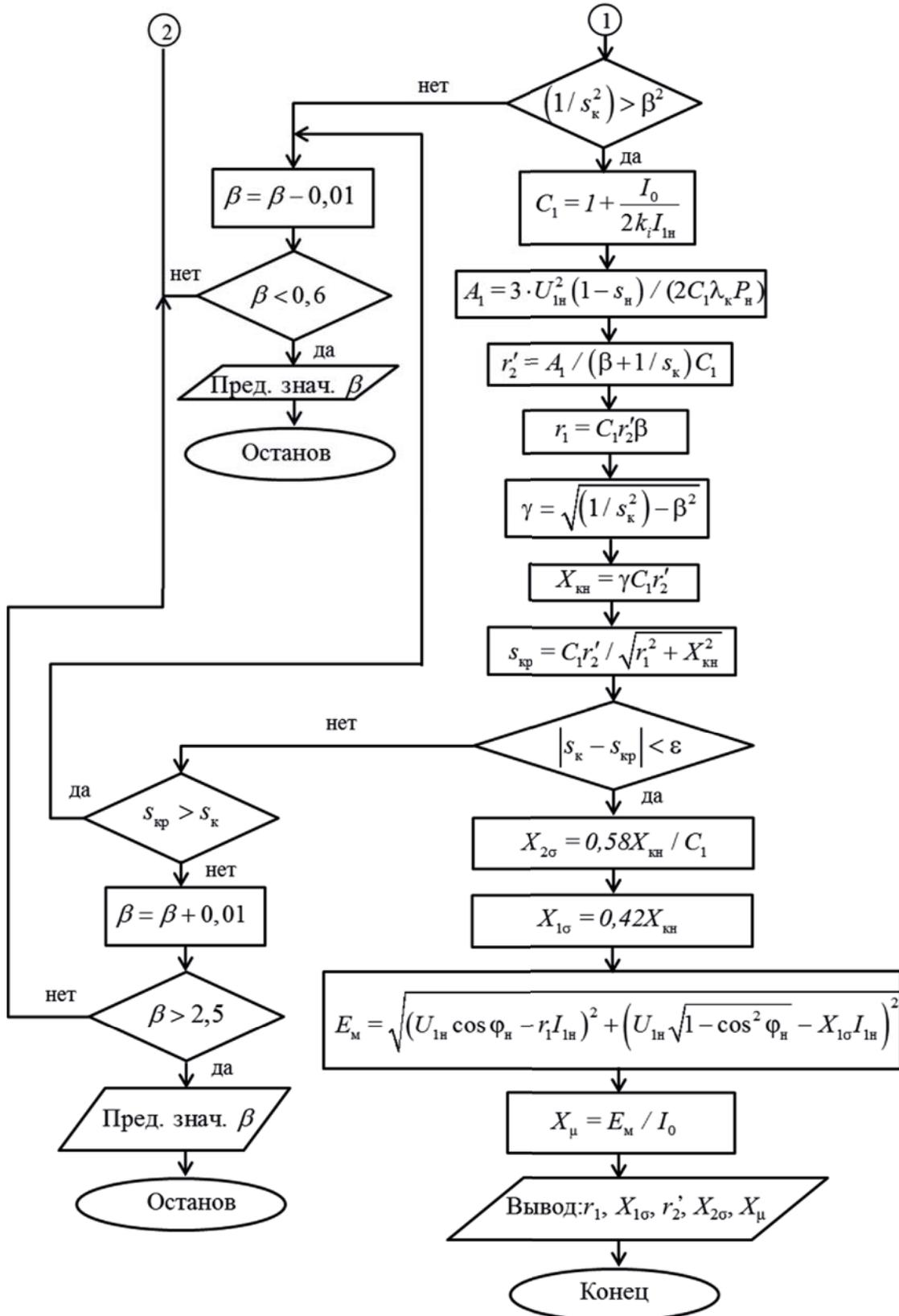


Рисунок 1. Блок-схема алгоритма расчета параметров схемы замещения асинхронных двигателей:
 где P_n – номинальная мощность двигателя, кВт;
 $U_{1н}$ – номинальное напряжение питания (фазное), В;

p_n – номинальная частота вращения, об/мин;
 p_0 – синхронная частота вращения магнитного поля статора АД, об/мин;
 ε – абсолютная погрешность несовпадения вычисляемых критических скольжений АД, о.е.;
 λ_k – кратность максимального момента относительно номинального, о.е.;
 s_n – номинальное скольжение АД, о.е.;
 C_1 – коэффициент приведения параметров Т-образной СЗ к Г-образной;
 A_1 – промежуточная переменная, В2/Вт;
 γ – промежуточная переменная, о.е.;
 $X_{кн}$ – индуктивное сопротивление обмоток для режима короткого замыкания (при неподвижном роторе АД), Ом;
 $X_{1\sigma}, X_{2\sigma}$ – индуктивные сопротивления рассеяния фазы статора и ротора, соответственно, Ом;
 E_m – э.д.с. ветви намагничивания, В;
 X_μ – индуктивное сопротивление ветви намагничивания, Ом.

Заключение

1. Анализ методик расчета параметров СЗ АД показывает, что существующие методики расчета можно разделить на итерационные, требующие организации сложных алгоритмов многократных уточнений расчетных параметров, и безитерационные, не требующие многократных уточнений расчетных параметров, что делает их более простыми. Однако, несмотря на то, что итерационные методики являются более сложными в организации процесса вычисления, они обеспечивают более точные результаты расчета параметров СЗ АД.

2. На точности расчета параметров СЗ АД значительно сказывается точность расчета тока холостого хода АД. При отсутствии данных по КПД η и коэффициенту мощности $\cos\phi_n$ при частичной нагрузке, не превышающей 50 % от номинальной, ток холостого хода I_0 целесообразно рассчитывать из баланса реактивной мощности, что обеспечивает высокую точность его расчета.

3. Несмотря на то, что предложенная методика расчета параметров СЗ АД является итерационной, она относительно несложна в организации процесса вычислений и обеспечивает высокую точность вычислений ее параметров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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

2. Мощинский, Ю.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным / Ю.А. Мощинский, В.Я. Беспалов, А. Кирыкин // Электричество, 1998. – № 4. – С. 38-42.

3. Дементьев, Ю.Н. Автоматизированный электропривод: учеб. пос. / Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. – Томск: Томский политехнический университет, 2009. – 224 с.

4. Дружинин, А.В. Определение параметров Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя при расчете систем управления частотно-регулируемым электроприводом / А.В. Дружинин, Е.А. Дружинина, В.Н. Полузадов // Изв. вузов. Горный журнал. – 2013. – № 3. – С. 98-105.

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

6. Гридин, В.М. Расчет характеристик асинхронных двигателей по каталожным данным / В.М. Гридин // Электричество, 2018. – № 9. – С. 44-48.

7. Прищепов, М.А. Расчет параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным и построение их естественных механических и электромеханических характеристик / М.А. Прищепов, Е.М. Прищепова, Д.М. Иванов // Агропанорама, 2016. – № 5 (117). – С. 20-32.

8. Определение тока холостого хода асинхронного электродвигателя / Г.Г. Лебедев [и др.] // Электротехнические системы и комплексы. – 2020. – № 3 (48). – С. 52-58.

9. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины: учеб. для вузов / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.

10. Вольдек, А.И. Электрические машины: учеб. для вузов / А.И. Вольдек. – 2-е изд.; перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.

11. Быстрицкий, Д.Н. Регулируемые асинхронные двигатели в сельскохозяйственном производстве / Под ред. Д.Н. Быстрицкого. – М.: Энергия, 1975. – 399 с.

12. Донской, Н.В. Определение параметров асинхронных двигателей по паспортным данным и пусковым характеристикам // Труды VII Международной (XII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу / Н.В. Донской. – ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2012. – С. 196-201.

13. Драчев, Г.И. Теория электропривода: учеб. пособие / Г.И. Драчев. – Челябинск: ЮУрГУ, 2005. – Часть 1. – 209 с.

14. Сыромятников, И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников. – М.: ГЭИ, 1969. – 527 с.

15. Гусев, Н.В. Автоматизация технологических комплексов и систем в промышленности: учеб. пособие по курсовому проектированию / Н.В. Гусев, С.В. Ляпушкин, М.В. Коваленко. – Томск: Томский политехнический университет, 2013. – 186 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 08.06.2021