

ВЫЯВЛЕНИЕ АСИНХРОННОГО РЕЖИМА И СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЕМ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Сергей Владимирович Деркачёв, sergey_derkachev@mail.ru
Донецкий национальный технический университет, Донецк

Аннотация. В работе представлены результаты исследований, направленные на выявление асинхронного режима возбужденных синхронных электродвигателей и сохранение их устойчивости. Выявление асинхронного режима предложено выполнять с помощью степенного полинома из отношения степеней активной и реактивной мощностей, определяемых на основе измеряемых мгновенных значений токов и напряжений статора синхронного электродвигателя. Управление системой возбуждения синхронного двигателя предлагается выполнять путем циклического переключения обмотки возбуждения на добавочное сопротивление или возбудитель на основе критерия, представляющего собой производную степенного полинома из отношения степеней активной и реактивной мощностей синхронного двигателя. Предложенные способы выявления асинхронного режима возбужденного синхронного двигателя и управления его системой возбуждения для обеспечения успешной ресинхронизации синхронного двигателя без разгрузки приводимого агрегата могут быть использованы в микропроцессорных устройствах защиты синхронных электродвигателей. Эффективность предложенных методов выявления асинхронного режима и управления возбуждением синхронного электродвигателя подтверждены результатами математического моделирования.

Ключевые слова: синхронный двигатель, асинхронный режим, подача возбуждения, ресинхронизация

Для цитирования: Деркачёв С.В. Выявление асинхронного режима и способ управления возбуждением синхронного электродвигателя // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 1. С. 71–77. DOI: 10.14529/power220108

Original article
DOI: 10.14529/power220108

DETERMINATION OF ASYNCHRONOUS MODE AND METHOD TO CONTROL THE EXCITATION OF A SYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR

Sergey V. Derkachev, sergey_derkachev@mail.ru
Donetsk National Technical University, Donetsk

Abstract. The paper presents the results of research aimed at identifying the asynchronous mode of excited synchronous electric motors and their safety and stability. It is proposed to identify the asynchronous mode using a power polynomial from the ratio of the degrees of active and reactive power, determined from measured instantaneous values of currents and stator voltages of a synchronous electric motor. It is proposed to control the excitation system of a synchronous motor by cyclically switching the excitation winding to an additional resistance or an exciter based on a criterion representing the derivative of the power polynomial from the ratio of the active and reactive powers of the synchronous motor. The proposed methods for detecting the asynchronous mode of excited synchronous motors and controlling the excitation system to ensure successful resynchronization of a synchronous motor without unloading the driven unit can be used in microprocessor-based protection devices for synchronous electric motors. The effectiveness of the proposed methods is confirmed through mathematical modeling.

Keywords: synchronous motor, asynchronous mode, excitation feed, resynchronization

For citation: Derkachev S.V. Determination of asynchronous mode and method to control the excitation of a synchronous electric motor. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering.* 2022;22(1): 71–77. (In Russ.) DOI: 10.14529/power220108

Введение

Обладая рядом преимуществ по сравнению с другими электродвигателями, синхронные двигатели получили достаточно широкое распространение в системах электроснабжения крупных промышленных предприятий. Кратковременные нарушения в системе внешнего электроснабжения промышленных предприятий, обусловленные короткими замыканиями и действием противоаварийной автоматики, могут привести к возникновению асинхронного режима возбужденного синхронного электродвигателя. Появление асинхронного режима представляет опасность для электродвигателя, поскольку в таком режиме в двигателе возникают пульсации вращающего момента и токов, величины которых могут значительно превышать номинальные значения, что является частой причиной выхода из строя явнополюсных синхронных электродвигателей, используемых в качестве привода шаровых мельниц [1]. При возникновении асинхронного режима на синхронных электродвигателях должна быть предусмотрена защита, выявляющая его появление и действующая на гашение поля ротора с последующей ресинхронизацией [2, 3]. В известных защитах от возникновения асинхронного режима в качестве пусковых органов, как правило, используются токи обмоток ротора и статора, величина угла между током и

напряжением статора, направление реактивной мощности, а также сопротивление на выводах статора [2, 4]. Однако указанные пусковые органы способны выявить только потерю возбуждения синхронного электродвигателя и не способны обеспечить защиту при нарушении устойчивости. Для осуществления успешной ресинхронизации в режимах самозапуска необходима разгрузка приводимого агрегата [5, 6], что в условиях непрерывного производства является невозможным. Одним из путей обеспечения успешного самозапуска является циклическое управление системой возбуждения синхронного электродвигателя [7–9]. Однако приведенные способы либо требуют установки дополнительных датчиков на электродвигатели [7, 8], либо не эффективны в области малых скольжений [9].

Цель работы. Целью данной работы является совершенствование методов выявления асинхронного режима синхронного электродвигателя и управления его системой возбуждения для успешной ресинхронизации.

Разработка критериев выявления асинхронного режима и управления возбуждением синхронного двигателя

С помощью математической модели участка сети, которая представляет собой двухтрансформаторную подстанцию, питающую двигательную

Каталожные данные синхронного двигателя мощностью 2460 кВт
Catalog data for a 2460 kW synchronous motor

| Тип двигателя | I_H , А | n , об/мин | $\cos\phi_H$, о.е. | η_H , о.е. | $I_{П}$, о.е. | $M_{П}$, о.е. | M_M , о.е. | $I_{ЛH}$, А | $U_{ЛH}$, В | T_{f0} , о.е. |
|---------------|-----------|--------------|---------------------|-----------------|----------------|----------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|
| ДСЗ-2209 | 274 | 100 | 0,9 | 0,938 | 5,2 | 1,5 | 1,3 | 275 | 192 | 1,44 |

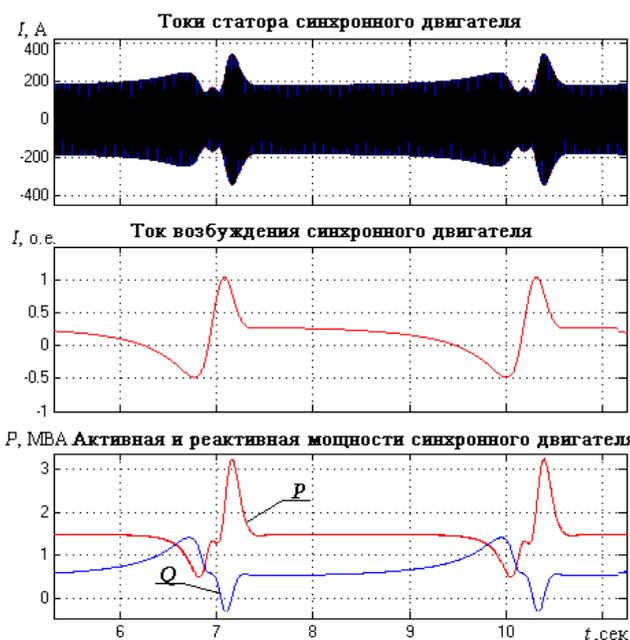


Рис. 1. Результаты моделирования асинхронного режима возбужденного синхронного электродвигателя
Fig. 1. Simulation of the asynchronous mode of the excited synchronous motor

нагрузку в виде синхронных и асинхронных электродвигателей, выполним моделирование асинхронного режима синхронного двигателя мощностью 2460 кВт и напряжением статора 6 кВ. Подробное описание математической модели приведено в [10], а каталожные данные исследуемого двигателя представлены в таблице. На рис. 1 показаны результаты моделирования асинхронного режима возбужденного синхронного электродвигателя.

Из рис. 1 видно, что возбужденный синхронный электродвигатель при номинальной нагрузке может переходить в асинхронный режим с малыми значениями скольжения и большой длительностью проворота ротора, равной нескольким секундам, и значительными скачками тока при каждом провороте ротора. В связи с этим возникает необходимость разработки высокочувствительной защиты для выявления асинхронного режима возбужденного синхронного двигателя.

Как видно из рис. 1, из-за несимметрии сопротивлений по продольной и поперечной осям ротора в асинхронном режиме возникают колебания не только токов статора, но и активной и реактивной мощностей. Поэтому в качестве критерия для выявления асинхронного режима возбужденного синхронного электродвигателя в работе предлагается использовать степенной полином отношения активной и реактивной мощностей.

Математически критерий выявления асинхронного режима описывается следующим выражением

$$K = \frac{Q(t)}{P(t)} + \left(\frac{Q(t)}{P(t)}\right)^n, \quad (1)$$

где $Q(t)$ – реактивная мощность синхронного электродвигателя;

$P(t)$ – реактивная мощность синхронного электродвигателя;

n – показатель степени, зависящий от типа синхронного двигателя, может быть принят в диапазоне от 1 до 2.

Для определения активной и реактивной мощностей синхронного электродвигателя на основе мгновенных значений токов и напряжений статора могут быть использованы формулы:

$$P(t) = \frac{2}{3}(u_a \cdot i_a + u_b \cdot i_b + u_c \cdot i_c); \quad (2)$$

$$Q(t) = \frac{2}{3}\left(\frac{u_b - u_c}{\sqrt{3}} \cdot i_a + \frac{u_c - u_a}{\sqrt{3}} \cdot i_b + \frac{u_a - u_b}{\sqrt{3}} \cdot i_c\right), \quad (3)$$

где u_a, u_b, u_c – мгновенные значения напряжений статора;

i_a, i_b, i_c – мгновенные значения токов статора.

Второй член в выражении (1) учитывается только при переходе синхронного электродвигателя в режим потребления реактивной мощности и ее изменении при каждом провороте ротора.

На рис. 2 показан характер изменения критерия асинхронного режима возбужденного синхронного электродвигателя.

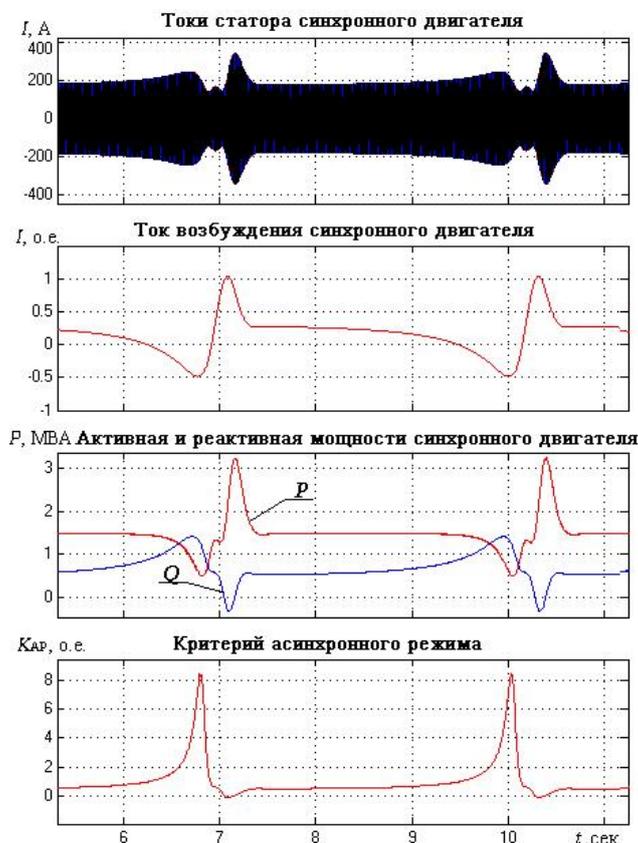


Рис. 2. Характер изменения критерия асинхронного режима возбужденного синхронного электродвигателя

Fig. 2. Changes to the criterion of the asynchronous mode of the excited synchronous motor

Из рис. 2 видно, что во время возникновения асинхронного режима возбужденного синхронного электродвигателя при каждом провороте ротора происходит уменьшение активной мощности и увеличение реактивной, что приводит к резкому увеличению значения критерия выявления асинхронного режима.

В этом случае возникновение асинхронного режима может быть определено по превышению значением критерия асинхронного режима заданной уставки, величина которой может быть принята в пределах от 2 до 2,5 о.е.

С целью исключения ложного срабатывания

защиты от асинхронного режима при пуске синхронного электродвигателя действие защиты должно быть заблокировано до момента подачи возбуждения при пуске электродвигателя.

В связи с вышесказанным структурная схема защиты от появления асинхронного режима возбужденного синхронного электродвигателя имеет вид, показанный на рис. 3.

Предложенный критерий выявления асинхронного режима возбужденного синхронного электродвигателя наиболее точно описывает характер изменения угла вылета ротора, что делает возможным его использование для циклического

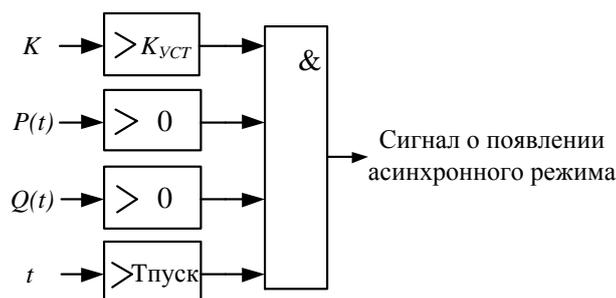


Рис. 3. Структурная схема защиты от асинхронного режима возбужденного синхронного двигателя
Fig. 3. Structural diagram of protection against the asynchronous mode of an excited synchronous motor

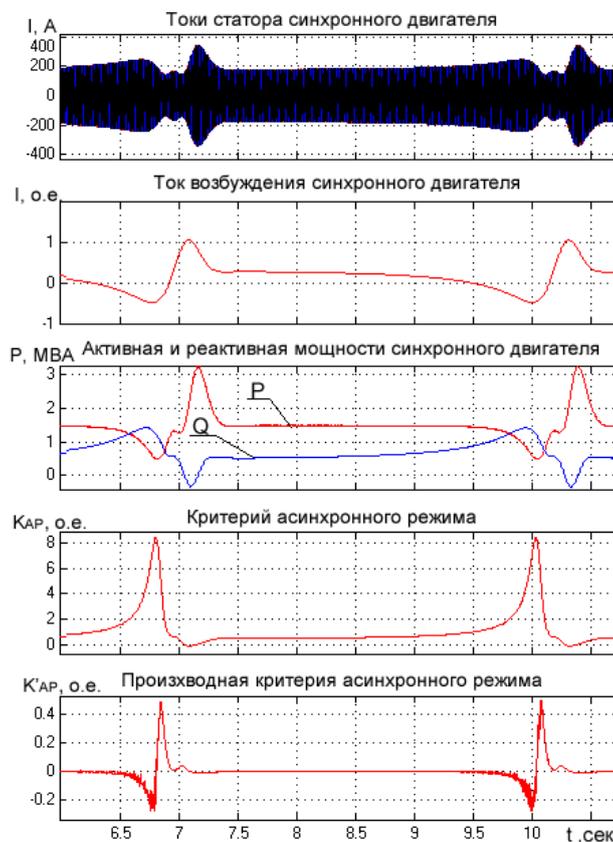


Рис. 4. График изменения критерия асинхронного режима и его производной при асинхронном режиме возбужденного двигателя
Fig. 4. Graph of the criterion of the asynchronous mode and its derivative in the asynchronous mode of the excited engine

управления возбуждением синхронного электродвигателя в режимах ресинхронизации. Поэтому в данной работе в качестве критерия управления циклической подачей возбуждения в режиме ресинхронизации предлагается использовать производную критерия выявления асинхронного режима, которая может быть определена на основе нескольких выборов критерия по формуле

$$K'_n = \frac{1}{2\omega h} (3K_n - K_{n-1} + K_{n-2}), \quad (4)$$

где h – шаг дискретизации;

ω – угловая частота измеряемого сигнала.

На рис. 4 показаны графики изменения критерия асинхронного режима и его производной при асинхронном режиме возбужденного синхронного электродвигателя.

Из приведенных на рис. 4 графиков видно, что производная критерия асинхронного режима при возникновении асинхронного режима возбужденного синхронного электродвигателя имеет меньшее запаздывание, чем сам критерий, и обладает более резким характером изменения.

Для обеспечения успешной ресинхронизации нагруженного синхронного электродвигателя и увеличения асинхронного момента в области малых скольжений в работе предлагается в зависи-

мости от знака производной критерия асинхронного режима выполнять циклическое поочередное подключение обмотки возбуждения к добавочному сопротивлению и источнику напряжения возбуждения.

Работа алгоритма циклического управления возбуждением синхронного электродвигателя в режиме ресинхронизации заключается в следующем: при отрицательном значении производной критерия асинхронного режима обмотка возбуждения синхронного электродвигателя подключается к добавочному сопротивлению и после выхода на подсинхронную скорость в обмотку возбуждения подается номинальное напряжение возбуждения, а в случае превышения производной критерия асинхронного режима заданной уставки в обмотку возбуждения подается форсированное напряжение возбуждения.

Результаты математического моделирования

На рис. 5 приведены результаты математического моделирования циклического управления возбуждением синхронного электродвигателя в режиме ресинхронизации по предложенному в данной работе алгоритму.

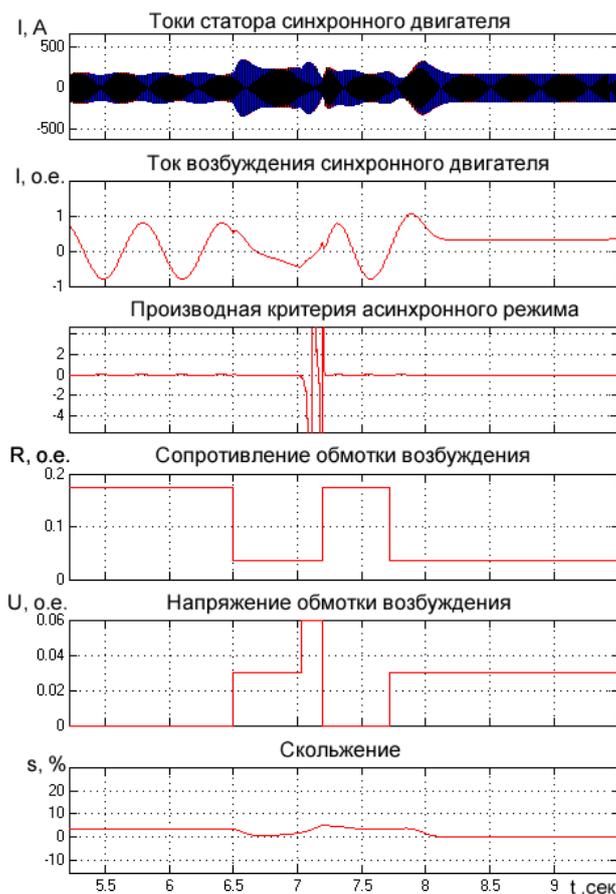


Рис. 5. Результаты моделирования подачи возбуждения на синхронный двигатель в режиме ресинхронизации
Fig. 5. Simulation results of excitation to a synchronous motor in the resynchronization mode

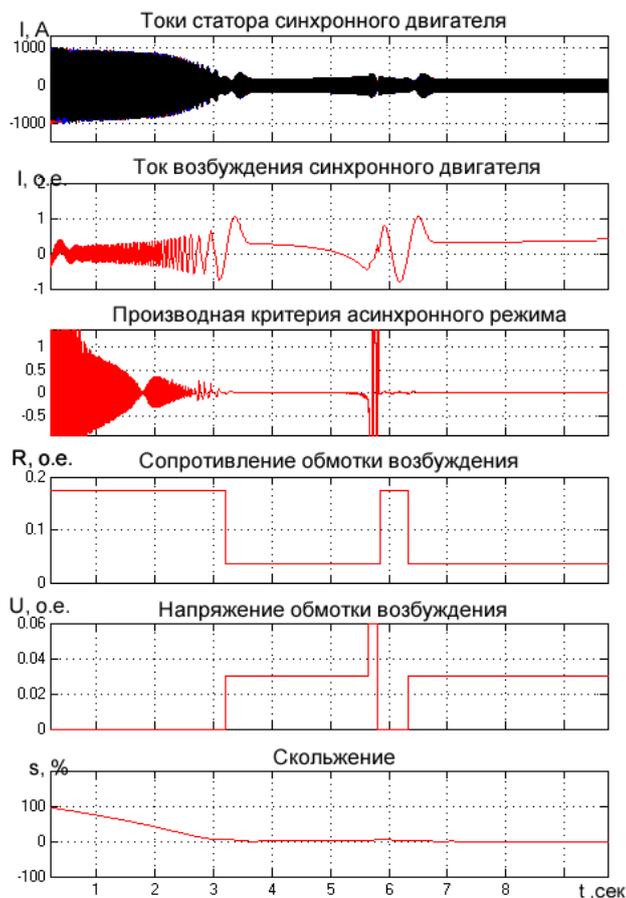


Рис. 6. Результаты моделирования пуска нагруженного синхронного электродвигателя
Fig. 6. Results of modeling the start of a loaded synchronous motor

Из рис. 5 видно, что применение предложенного критерия асинхронного режима для циклического управления возбуждением позволяет обеспечить успешную ресинхронизацию нагруженного синхронного электродвигателя, работающего в асинхронном режиме.

Также предложенный алгоритм циклического управления возбуждением синхронного электродвигателя может быть использован для синхронизации нагруженного синхронного электродвигателя в режиме пуска. Результаты математического моделирования такого режима приведены на рис. 6.

Из результатов моделирования, приведенных на рис. 6, видно, что разработанный алгоритм циклического управления возбуждением позволяет обеспечить успешную синхронизацию нагруженного синхронного электродвигателя в режиме пуска.

Как видно из рис. 5 и 6, в режимах циклического управления возбуждением синхронного двигателя величины тока возбуждения и токов статора не превышают пусковых значений и тем самым не оказывают отрицательного воздействия на обмотки электродвигателя и не снижают его общую надежность.

Выводы

1. Предложен критерий выявления асинхронного режима возбужденного синхронного электродвигателя на основе степенного полинома из отношения степеней активной и реактивной мощностей, определяемых на основе измеряемых мгновенных значений токов и напряжений статора синхронного электродвигателя.

2. Использование разработанного алгоритма циклического управления возбуждением синхронного электродвигателя на основе производной критерия асинхронного режима позволяет за счёт увеличения асинхронного момента обеспечить более легкие условия ресинхронизации и пуска нагруженных электродвигателей.

3. Совместное использование предложенных алгоритмов выявления асинхронного режима возбужденного синхронного электродвигателя и алгоритма циклического управления возбуждением позволяют определить появление асинхронного режима и выполнить успешную ресинхронизацию нагруженного синхронного электродвигателя.

Список литературы

1. Сивокобыленко В.Ф., Левшов А.В. Защита синхронных электродвигателей от асинхронного режима // Электрические станции. 1989. № 2. С. 75–80.
2. Слодарж М.И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных двигателей. М.: Энергия, 1977. 216 с.
3. Корогодский В.И., Кужеков С.Л., Паперно Л.Б. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1987. 248 с.
4. Ванин В.Ч., Павлов Г.М. Релейная защита на элементах вычислительной техники. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 336 с.
5. Голоднов Ю.М. Самозапуск электродвигателей. М.: Энергоатомиздат, 1985. 136 с.
6. Беляев А.В. Противоаварийное управление в узлах нагрузки с синхронными электродвигателями большой мощности. М.: Энергопресс, 2004. 80 с.
7. Соколов Н.И., Сумцов, А.М. Кременецкий И.А. Ресинхронизация синхронных двигателей многократной форсировкой возбуждения // Электричество. 1975. № 5. С. 43–48.
8. Носов К.Б., Дворак М.Н. Средства и способы самозапуска электродвигателей. Кемерово: Кемеров. кн. изд-во, 1985. 128 с.
9. Абрамович Б.Н., Круглый А.А. Возбуждение, регулирование и устойчивость синхронных двигателей. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 70 с.
10. Сивокобыленко В.Ф., Деркачев С.В. Анализ переходных процессов в двигательной нагрузке при переключениях питания на резервный источник // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2016. № 5 (547). С. 69–74. DOI: 10.17213/0136-3360-2016-5-69-74

References

1. Sivokobylenko V.F., Levshov A.V. [Protection of synchronous electric motors against asynchronous operation]. *Elektricheskie stantsii*. 1989;(2):75–80. (In Russ.)
2. Slodazh M.I. *Rezhimy raboty, reley'naya zashchita i avtomatika sinkhronnykh dvigateley* [Operating modes, relay protection and automation of synchronous motors]. Moscow: Energiya Publ.; 1977. 216 p. (In Russ.)
3. Korogodskiy V.I., Kuzhekov S.L., Paperno L.B. *Reley'naya zashchita elektrodvigateley napryazheniem vyshhe 1 kV* [Relay protection of electric motors with voltage above 1 kV]. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 1987. 248 p. (In Russ.)
4. Vanin V.Ch., Pavlov G.M. *Reley'naya zashchita na elementakh vychislitel'noy tekhniki* [Relay protection on the elements of computer technology]. Leningrad: Energoatomizdat Publ.; 1991. 336 p. (In Russ.)
5. Golodnov Yu.M. *Samozapusk elektrodvigateley* [Self-starting of electric motors]. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 1985. 136 p. (In Russ.)
6. Belyaev A.V. *Protivoavariynoe upravlenie v uzлах nagruzki s sinkhronnymi elektrodvigatelyami bol'shoy moshchnosti* [Emergency control in load nodes with high-power synchronous electric motors]. Moscow: Energopress Publ.; 2004. 80 p. (In Russ.)
7. Sokolov N.I., Sumtsov I.A., Kremenetskiy A.M. [Resynchronization of synchronous motors by multiple forcing of excitation]. *Elektrichestvo = Soviet Electrical Engineering*. 1975;(5):43–48. (In Russ.)
8. Nosov K.B., Dvorak M.N. *Sredstva i sposoby samozapuska elektrodvigateley* [Means and methods of self-starting of electric motors]. Kemerovo: Kemerovskoe knizhnoe izdatel'stvo; 1985. 128 p. (In Russ.)
9. Abramovich B.N., Kruglyy A.A. *Vozbuzhdenie, regulirovanie i ustoychivost' sinkhronnykh dvigateley* [Excitation, regulation and stability of synchronous motors]. Leningrad: Energoatomizdat Publ.; 1983. 70 p. (In Russ.)
10. Sivokobylenko V.F., Derkachev S.V. Analysis of transients processes in motor load at switching on to reserve power supply source. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*, 2016;5:69–74 (In Russ.). DOI: 10.17213/0136-3360-2016-5-69-74

Информация об авторе

Деркачев Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электрические станции», Донецкий национальный технический университет, Донецк; sergey_derkachev@mail.ru.

Information about the author

Sergey V. Derkachev, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Department of “Electric Stations”, Donetsk National Technical University, Donetsk; sergey_derkachev@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 19.02.2022; одобрена после рецензирования 07.03.2022; принята к публикации 14.02.2022.

The article was submitted 19.02.2022; approved after reviewing 07.03.2022; accepted for publication 14.02.2022.