

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПОТЕРЕ ПИТАНИЯ ДЛЯ УСЛОВИЙ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

М.Б. Лащенко, Ю.В. Шевырёв

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия

Приведены результаты исследования работы синхронного двигателя при кратковременной потере напряжения, выполненные посредством моделирования в среде Simulink MATLAB. Исследования выполнены с учётом особенностей систем электроснабжения горных предприятий. Рассмотрен процесс самозапуска синхронного двигателя при различных значениях просадов питающего напряжения, возникающих при аварийных ситуациях. Одной из причин самозапуска может являться кратковременное глубокое снижение напряжения вследствие близкого короткого замыкания (КЗ). Восстановление питания в условиях горных предприятий происходит в условиях сниженной суммарной мощности источника питания. Потому неоправданное увеличение суммарной мощности синхронных электродвигателей, участвующих в самозапуске, может в этих условиях привести к отрицательным результатам. Выполнен анализ результатов исследования. Сделан вывод об эффективности модели, используемой для анализа динамических свойств синхронного двигателя при кратковременной потере питания.

Ключевые слова: самозапуск, синхронный двигатель, время срабатывания защиты, длина питающей линии, короткое замыкание, просадка напряжения.

Введение

В настоящее время на крупных горных предприятиях применяются синхронные электродвигатели (СД) большой единичной мощности. Пусковые токи таких электродвигателей значительно превышают величину паспортных номинальных значений, и в процессе эксплуатации они могут вызывать нарушение устойчивости режима узлов нагрузки. Поэтому исследование переходных процессов пуска после кратковременной потери питания является актуальной задачей, решение которой позволяет найти условия обеспечения электромагнитной совместимости синхронного электропривода и системы электроснабжения. При таких расчетах эффективным является метод моделирования электрических систем в различных математических пакетах.

Исследование публикаций по данной тематике показало, что, несмотря на значительное количество исследований в направлении повышения устойчивости работы СД при кратковременной потере питания, исследования, посвящённые этой тематике, не потеряли своей актуальности [1–3]. В качестве примера можно указать на работу [4], в которой приводятся результаты исследования по поддержанию устойчивости работы неявнополюсных синхронных двигателей.

Данная работа учитывает такие особенности систем электроснабжения горных предприятий, как: наличие двух источников питания с разными параметрами ЛЭП, влияние двух синхронных двигателей, подключенных к смежным шинам, друг на друга при групповом самозапуске.

В качестве объекта исследования был взят явнополюсный СД типа СДН-17-31-УХЛ4 ($P_{ном} = 630$ кВт, $U_{ном} = 6$ кВ, $\cos\varphi_{ном} = 0,9$), который применяется на крупных горных предприятиях как привод вентилятора главного проветривания.

Модель синхронного двигателя

В данном исследовании задача моделирования электромеханических систем с синхронными машинами (СМ) решается в программном комплексе MATLAB (Simulink).

При этом в данной модели принимаются следующие допущения:

- 1) моделирование выполняется в системе координат $d-q$;
- 2) насыщение и гистерезис намагничивающей характеристики магнитопровода не учитывается;
- 3) эффект вытеснения тока не учитывается.

Схемы замещения модели синхронного двигателя в Simulink-модели MATLAB по синхронным осям имеют вид, представленный на рис. 1 [5].

На рис. 1 приняты следующие обозначения: d, q – синхронные оси координат; R, s – переменная, которая относится к ротору или статору; l, m – индуктивность рассеяния или намагничивания; f, k – переменная относится к обмотке возбуждения или демпферной обмотке.

В таблице [5] приведены необходимые параметры модели СД, полученные на основании паспортных данных явнополюсного двигателя типа СДН-17-31-УХЛ4.

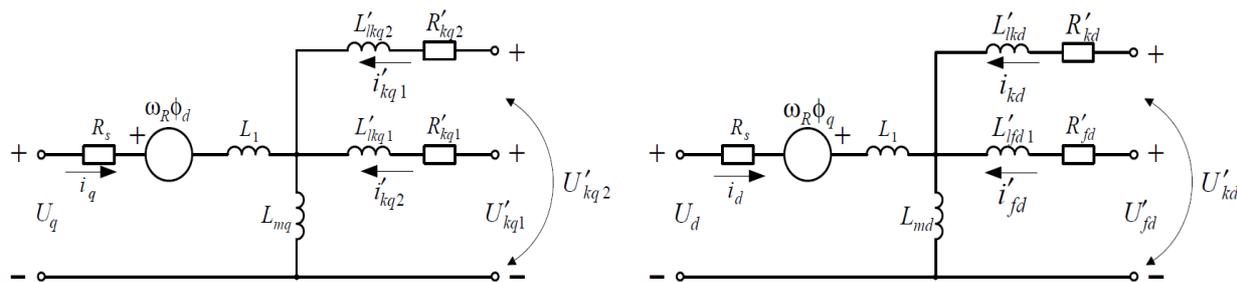


Рис. 1. Схемы замещения синхронного двигателя в Simulink-модели MATLAB

Параметры модели СД, использованные при моделировании

Обозначение параметра	Название параметра	Значение параметра
$U_{ном}$, кВ	Номинальное напряжение двигателя	6
$S_{ном}$, кВА	Номинальная полная мощность двигателя	700
$\cos\varphi_{ном}$	Коэффициент мощности двигателя	0,9
x_d , о.е.	Синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси	0,97
x_q , о.е.	Синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси	0,61
x''_d , о.е.	Сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси	0,32
x''_q , о.е.	Сверхпереходное индуктивное сопротивление по поперечной оси	0,29
T'_{d0} , с	Переходная постоянная времени при разомкнутой обмотке статора	0,75
T''_{d0} , с	Сверхпереходная постоянная времени при замкнутой обмотке статора	0,36
R_a , о.е.	Активное сопротивление статора	0,028
L_{kd} , о.е.	Индуктивность рассеяния демпферной обмотки по оси d	0,187
L_{kq} , о.е.	Индуктивность рассеяния демпферной обмотки по оси q	0,102
L_f , о.е.	Индуктивность рассеяния обмотки возбуждения	0,38
R_f , о.е.	Активное сопротивление обмотки возбуждения	0,23

Модель системы электроснабжения горного предприятия

Электроснабжение крупных горных предприятий как потребителей первой категории предусмотрено от двух источников. Нужно учитывать, что нередко восстановление питания после его аварийного прекращения происходит в условиях сниженной суммарной мощности источника питания (например, при аварийном отключении одного из двух вводов подстанции и автоматическом переводе всей ее нагрузки на другой ввод). Модель системы электроснабжения горного предприятия с учётом её особенностей приведена на рис. 2. Она включает в себя следующие элементы:

- трехфазные источники питания подстанций напряжением 35 кВ представлены блоками *ВВОД 1* и *ВВОД 2* и реализуются с помощью блоков *Three-Phase Source* из библиотеки *SimPowerSystems*;

- высоковольтные выключатели представлены блоками *ВВС-35 II-20/630* и *АВР* и реализуются с помощью блоков *Three-Phase Breaker* из библиотеки *SimPowerSystems*;

- силовые трансформаторы представлены блоками *ТДНС-16000/35/6* и реализуются с помощью блоков *Three-Phase Transformer (Two Winding)* из библиотеки *SimPowerSystems*;

- нагрузка на шинах 6 кВ представлена блоками *5 kW* и реализуются с помощью блоков *Three-Phase Series RLC Load* из библиотеки *SimPowerSystems*;

- измерительными приборы представлены блоками *Three-Phase V-I Measurement*;

- осциллографы представлены блоками *Scope*;

- явнопольные СД представлены элементами *СДН-17-31-УХЛ*, являющимися блоками *Synchronous Machine* из библиотеки *SimPowerSystems*;

- резисторы, подключаемые к обмотке возбуждения СД для реализации асинхронного пуска СД, представлены элементами *R_Start*;

- элементы *VF Source* являются источниками постоянного напряжения для питания обмотки возбуждения;

- элемент *Rate Limiter* является блоком ограничения скорости изменения сигнала и необходим для реализации асинхронного пуска СД.

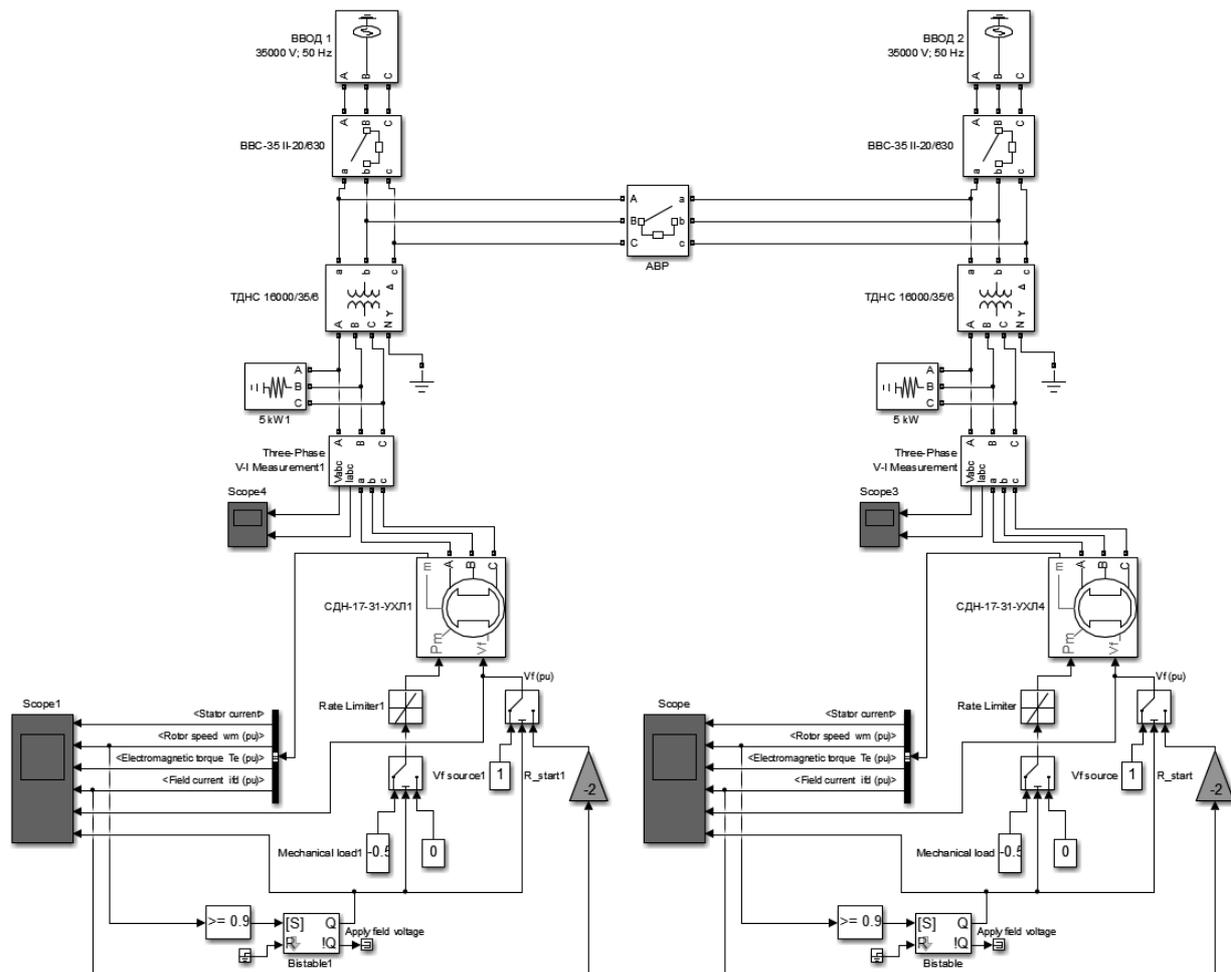


Рис. 2. Модель системы электроснабжения

Исследование самозапуска СД при кратковременной потере питания

Исследование самозапуска СД рассмотрено на примере аварийного отключения одного из источников питания вследствие аварии на подстанции (ВВОД 2) и переводе всей нагрузки на другой ввод (ВВОД 1).

Для реализации процесса пуска СД в модели реализован асинхронный пуск. При этом методе обмотку возбуждения замыкают на гасящий резистор, сопротивление которого в несколько раз выше активного сопротивления обмотки возбуждения. После разгона ротора до подсинхронной частоты обмотку возбуждения отключают от гасящего резистора и подключают к источнику постоянного тока. Постоянный ток, проходящий по обмотке возбуждения, создает синхронизирующий момент, который втягивает ротор в синхронизм [6].

Кратковременная потеря напряжения реализуется следующим образом: ВВОД 2 обесточивается через 4 с (время, необходимое СД на вхождение в синхронизм и выхода на номинальную скорость) после начала работы с помощью блока BVC-35 II-20/630 соответствующей линии, время

срабатывания АВР и длина ЛЭП задаются различными для результатов исследования. При исследовании режима самозапуска на модели задаются следующие времена срабатывания защиты (АВР): $t_{ср1} = 0,1$ с, $t_{ср2} = 0,2$ с, $t_{ср3} = 0,3$ с, и длины линии электропередачи: $l_1 = 0,5l$, $l_2 = l$, $l_3 = 2l$.

Для удобства анализа переходных процессов величины на графиках заданы в о.е. За базисные значения приняты ток статора $I_{ном} = 67$ А, скорость двигателя $n_{ном} = 250 \frac{об}{мин}$ и длина ЛЭП $l = 11$ км.

Графики переходных процессов для случая $t_{ср2} = 0,2$ с и $l_2 = l$ приведены на рис. 3. На графиках приведены зависимости изменения частоты вращения ротора и тока статора от времени $t_{ср2}$ при длине ЛЭП $l_2 = l$ для следующих режимов: переходный процесс при пуске СД, установившийся режим, самозапуск СД при кратковременной потере питания, установившийся режим.

Анализ графиков переходных процессов для заданных времен срабатывания защиты и длин линии электропередачи показывает, что при кратковременной просадке напряжения питания существенно возрастает ток статора, превышающий ток

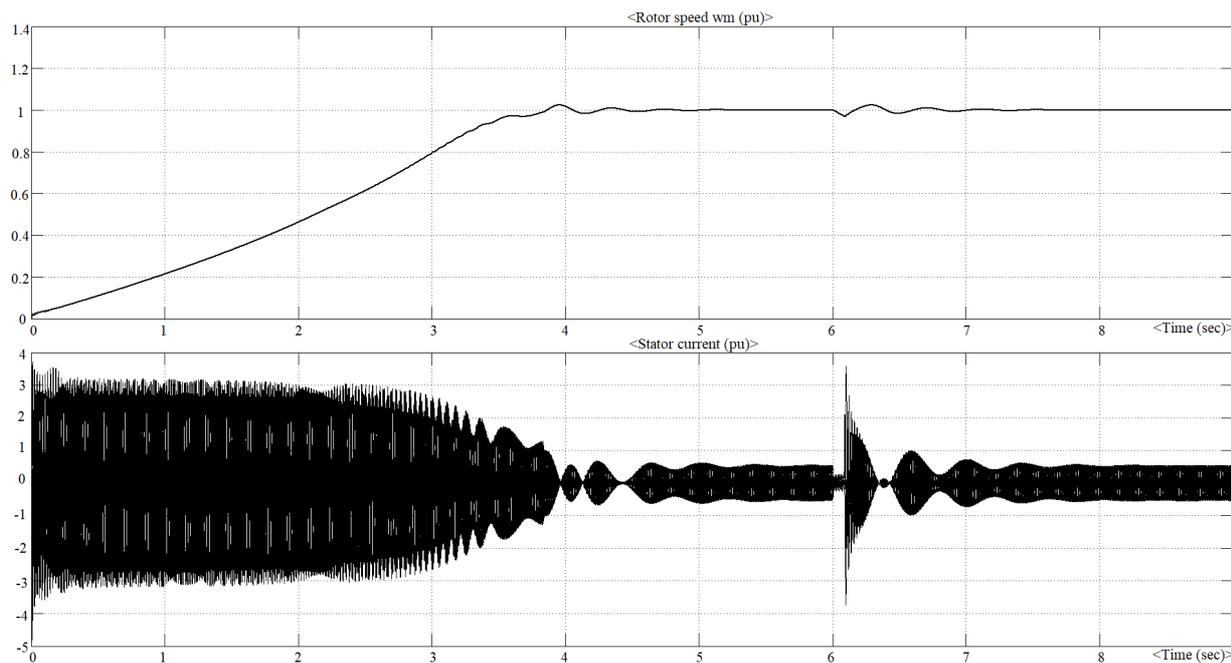


Рис. 3. Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора при l_2 и t_{cp2}

статора при асинхронном пуске, а также имеет место просадка скорости СД.

По результатам анализа переходных процессов построены графики зависимостей $t_{и} = f(t_{cp})$ (рис. 4) и $I_{и} = f(t_{cp})$ (рис. 5), где t_{cp} – время срабатывания АВР, $t_{и}$ – время, за которое двигатель выходит на номинальную скорость после восстановления питания в секундах, $I_{и}$ – максимальное значение тока статора при кратковременной просадке напряжения питания в относительных единицах, при длинах питающей линии: $l_1 = 0,5l$, $l_2 = l$, $l_3 = 2l$.

Анализ графиков на рис. 4 показывает, что с увеличением времени срабатывания АВР от 0,1 до 0,3 с, и длины ЛЭП время выхода СД на номи-

нальную скорость после восстановления питания возрастает от 1 до 1,9 с.

Анализ графиков на рис. 5 показывает, что во всех рассмотренных случаях ток статора двигателя при самозапуске превышает пусковой ток. С увеличением времени срабатывания АВР от 0,1 до 0,3 с, и увеличением длины ЛЭП ток статора СД изменяется от 2,1 до 5,3 о.е., т.е. возрастает почти в 1,5 раза, что необходимо принимать во внимание при выборе СД и его защиты.

На рис. 6 показаны графики изменения частоты вращения ротора и тока статора при $l_2 = l$ и увеличении t_{cp} до 0,4 с. Из приведённых графиков видно, что в этом случае имеет место выпадение СД из синхронизма.

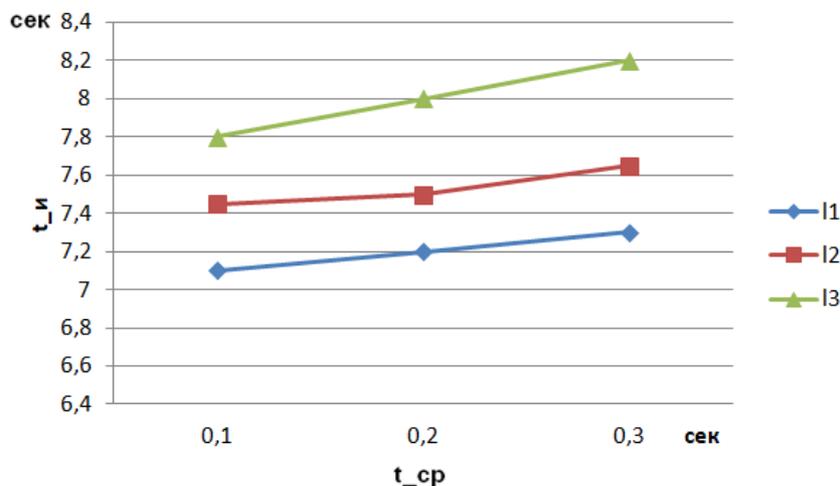


Рис. 4. Графики зависимостей $t_{и} = f(t_{cp})$ при длинах питающей линии: $l_1 = 0,5l$, $l_2 = l$, $l_3 = 2l$

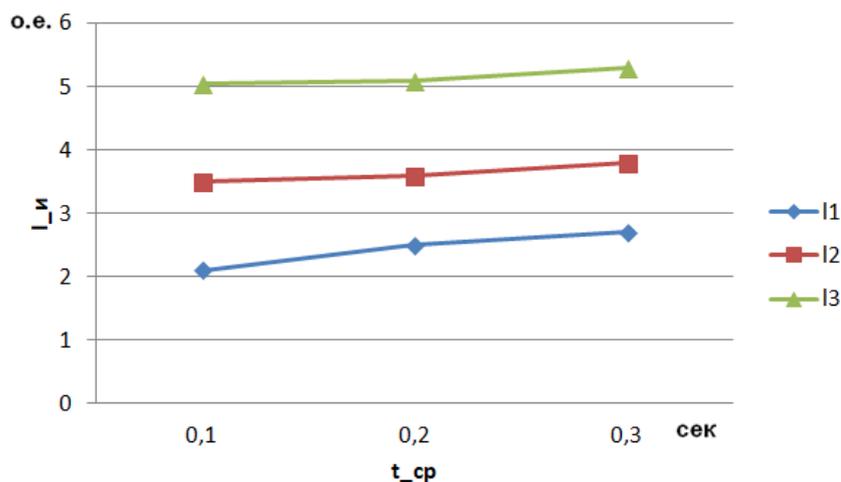


Рис. 5. Графики зависимостей $I_{и} = f(t_{ср})$ при длинах питающей линии: $l_1 = 0,5l, l_2 = l, l_3 = 2l$

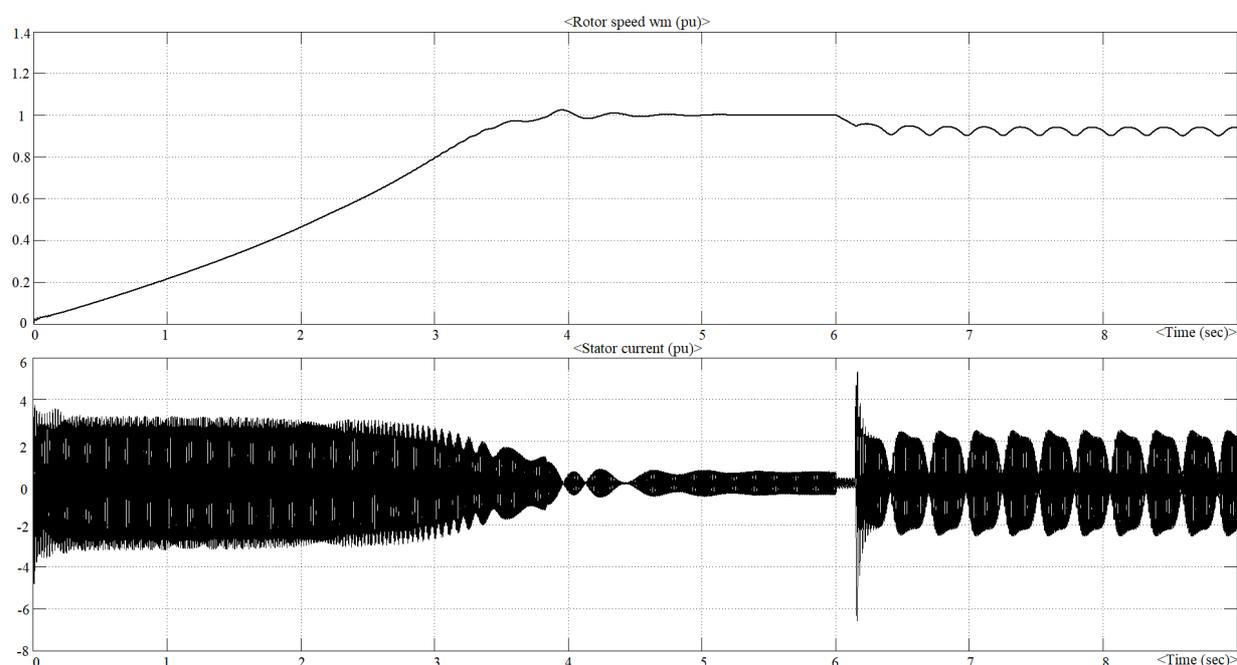


Рис. 6. Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора при $l_2 = l$ и $t_{ср} = 0,4$ с

Заключение

По результатам выполненных исследований сделаны следующие выводы.

1. Чем больше время срабатывания защиты АВР и длина ЛЭП от подстанции до СД, тем больше времени требуется двигателю для восстановления нормального режима работы. Это в свою очередь может привести к выпадению СД из синхронизма.

2. При самозапуске СД ток статора возрастает с увеличением времени срабатывания АВР. При отключении от сети одного или группы двигателей на шинах подстанции растет остаточная ЭДС и при этом ток включения двигателя может превышать пусковой ток более чем в 2 раза.

3. Исследование системы электроснабжения горного предприятия при наличии СД на модели позволяет обоснованно подойти к выбору проектных решений и тем самым избежать осложнений при кратковременной потере напряжения на крупных горных предприятиях при эксплуатации электроприводов.

Литература

1. Пупин, В.М. Анализ провалов напряжения в питающих сетях предприятий и способы защиты электрооборудования / В.М. Пупин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2011. – № 4. – С. 35–41.

2. Пупин, В.М. Исследование режимов пуска и самозапуска электродвигательной нагрузки с це-

лю обеспечения непрерывности технологических процессов / В.М. Пупин // Промышленная энергетика. – 2006. – № 7. – С. 27–33.

3. Фёдоров, О.В. Некоторые особенности структуры систем внутрицехового электропитания / О.В. Фёдоров // Надежность и безопасность энергетики. – 2015. – № 3 (30). – С. 30–33.

4. Михалев, С.В. Повышение устойчивости синхронных двигателей при кратковременной потере

питания / С.В. Михалев // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2012. – № 10. – С. 62–68.

5. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – СПб.: Питер, 2007. – С. 11–34.

6. Брускин, Д.Э. Электрические машины / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов. – М.: Высшая школа, 1987. – Ч. 2. – 335 с.

Лашенов Михаил Борисович, аспирант, кафедра «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва; mixan9524@gmail.com.

Шевырёв Юрий Вадимович, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва; uvshev@yandex.ru.

Поступила в редакцию 26 ноября 2019 г.

DOI: 10.14529/power200113

RESEARCH OF THE SYNCHRONOUS MOTOR PERFORMANCE WITH A SHORT POWER LOSS FOR THE MINING INDUSTRY

M.B. Lashchenov, mixan9524@gmail.com,

Yu.V. Shevyrev, uvshev@yandex.ru

National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation

The paper discusses the results of a study into a synchronous motor model, conducted in MATLAB Simulink environment with account to the mining industry power supply peculiarities. The results of self-starting at different supply voltage subsidence values are presented and analyzed comparatively. The paper presents a conclusion about the efficiency of the models used to analyze the dynamic properties of a synchronous motor with short-term power loss. Self-start is a process of personnel – free recovery of the engine’s normal operation after a short-term feeding tension shutdown or deep undervoltage. The self-start can occur after a short-term deep undervoltage, arising due to a close short circuit (SC). Quite often the restoration of power supply after the emergency termination happens in the conditions of the reduced total power. An unjustified increase in the total power of the electric motors involved in self-start can bring about negative results.

Keywords: self-starting, synchronous motor, protection response time, supply line length, short circuit, voltage dip.

References

1. Pupin V.M. [Analysis of voltage dips in the supply networks of enterprises and methods of protection of electrical equipment]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont* [Electrical Equipment: Operation and Repair], 2011, no. 4, pp. 35–41. (in Russ.)

2. Pupin V.M. [Research of modes of start-up and self-start of electric load for the purpose of ensuring continuity of technological processes]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering], 2006, no. 7, pp. 27–33. (in Russ.)

3. Fedorov O.V. [Some features of the structure of intra-shop power supply systems]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki* [Reliability and Safety of Energy], 2015, no. 3 (30), pp. 30–33. (in Russ.)

4. Mikhalev S.V. [Increasing the stability of synchronous motors in case of short-term power loss]. *Izvestiya SPbGETU “LETI”* [Transactions of Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”], 2012, no. 10, pp. 62–68. (in Russ.)

5. Chernykh I.V. *Modelirovaniye elektrotekh-nicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. St. Petersburg, Piter Publ., 2007, pp. 11–34.

6. Bruskin D.E., Zorokhovich A.E., Khvostov V.S. *Elektricheskie mashiny* [Electrical Machinery]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1987, part 2. 335 p.

Received 26 November 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Лашенов, М.Б. Исследование работы синхронного двигателя при кратковременной потере питания для условий горных предприятий / М.Б. Лашенов, Ю.В. Шевырев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 116–122. DOI: 10.14529/power200113

FOR CITATION

Lashchenov M.B., Shevyrev Yu.V. Research of the Synchronous Motor Performance with a Short Power Loss for the Mining Industry. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 116–122. (in Russ.) DOI: 10.14529/power200113
