

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В РЕЖИМЕ САМОЗАПУСКА ПОГРУЖНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ ВОДЫ НАСОСА

А. А. Кирякин, Д. А. Хнычев

Проведено исследование режима самозапуска погружного асинхронного электродвигателя, используемого в составе электрического центробежного насоса для воды. Цель исследования заключается в разработке математической модели данного двигателя в составе электропривода водяного насоса для анализа режима самозапуска, оценки влияния времени выбега и величины восстановливающего напряжения на переходные процессы. В рамках работы проведено имитационное моделирование в среде MATLAB Simulink, что позволило исследовать параметры, такие как амплитуда ударного тока и длительность самозапуска при различных временных интервалах отсутствия питания, а также при пониженном восстановливающем напряжении. Результаты моделирования показали, что время выбега играет важную роль в процессе самозапуска.

Ключевые слова: самозапуск, асинхронный электродвигатель, электрический центробежный насос для воды, переходные процессы, имитационное моделирование.

Введение

В различных отраслях промышленности самозапуск центробежных насосов играет важную роль, особенно это касается тех производственных процессов, где даже кратковременный перерыв подачи воды может привести к аварийным ситуациям. Для обеспечения непрерывного снабжения водой создают резервные напорные емкости и другие подобные сооружения, которые могут накапливать воду. Использование самозапуска погружного асинхронного электродвигателя в составе электрического центробежного насоса для воды (ЭЦВ) позволяет отказаться от использования резервов во время перерывов подачи электроэнергии [1].

Самозапуском называется процесс автоматического восстановления работы электродвигателя до номинального режима после кратковременного отсутствия питания или значительной просадки напряжения без участия ответственных работников. Этот процесс заключается в том, что двигатель, снизив свою частоту вращения за время отключения от источника питания или снижения уровня напряжения, не выключается защитной аппаратурой, а при восстановлении питающего напряжения достигает номинальной частоты вращения [2]. Кратковременный перерыв питания может происходить при переключении на резервный источник питания. Кратковременное глубокое снижение напряжения наблюдается при коротком замыкании в системе питания электродвигателей.

В настоящее время самозапуск широко применяется во многих отраслях промышленности (сельское хозяйство, пищевая промышленность, энергетика и т. д.). Применение самозапуска в сочетании с автоматическими системами управления и защитным оборудованием обеспечивает надежную и бесперебойную работу различных типов производств.

Правильная настройка защитной аппаратуры является залогом успешного самозапуска двигателей. Эффективная защита позволяет избежать повреждений оборудования и обеспечивает его надежную работу в условиях кратковременных перебоев в электроснабжении. В связи с этим имитационное моделирование процесса самозапуска является актуальной задачей для обеспечения непрерывной и надежной работы насосного оборудования.

Целью данной работы является разработка математической модели погружного асинхронного двигателя в составе электропривода электроцентробежного водяного насоса для моделирования и анализа режима самозапуска насосного агрегата, а также оценка влияния продолжительности времени выбега и величины восстановливающего напряжения на переходные процессы при последующем повторном пуске.

Задачи данного исследования:

- разработка математической модели погружного асинхронного двигателя, используемого в составе электропривода электроцентробежного водяного насоса, для анализа режима самозапуска;
- имитационное моделирование процесса самозапуска насосного агрегата, включая оценку переходных процессов при различных временных интервалах выбега;
- анализ влияния продолжительности времени выбега на параметры самозапуска, такие как амплитудное значение ударного тока и длительность повторного пуска;
- сравнительный анализ полученных данных о параметрах самозапуска с результатами, полученными при прямом пуске;
- оценка влияния условий восстановления питания на эффективность самозапуска, включая анализ ситуации с понижением напряжения на зажимах электродвигателя.

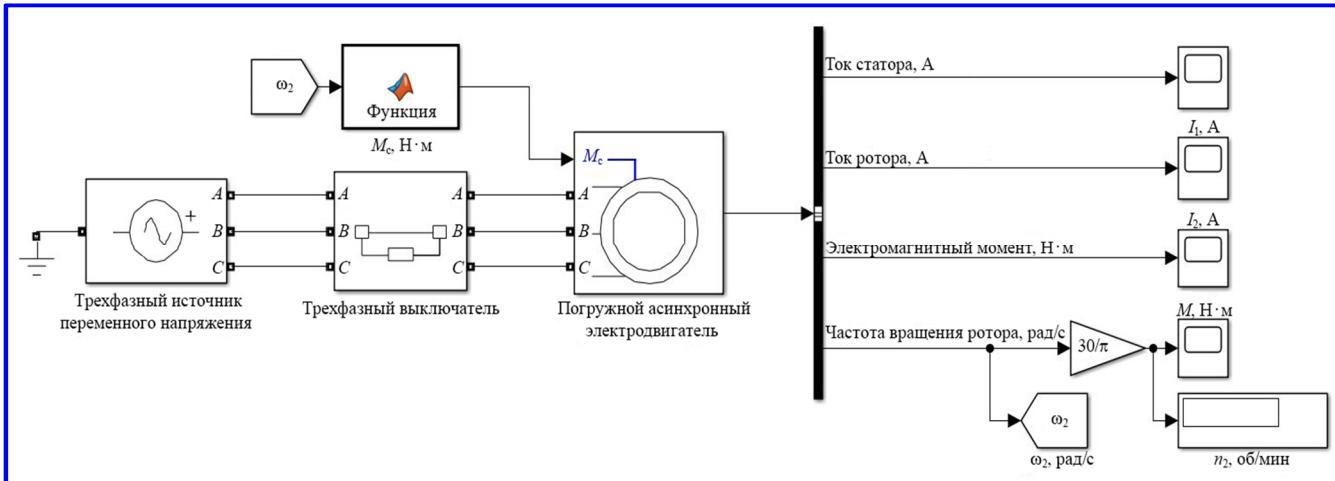


Рис. 1. Структурная схема модели, имитирующей самозапуск погружного асинхронного двигателя в составе электрического центробежного насоса для воды

Моделирование процесса самозапуска насосного агрегата

Для исследования процесса самозапуска погружного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором совместно с насосом была разработана структурная схема модели в программе MATLAB Simulink (рис. 1). Модель обладает упрощенной структурой, что делает её удобной для практического применения. Данная модель позволяет анализировать такие параметры, как величина пускового тока и токов при самозапуске, а также оценивать изменение частоты вращения ротора во время повторного пуска при различном времени выбега.

Данная модель включает в себя несколько ключевых компонентов, необходимых для анализа работы электродвигателя в условиях кратковременного отключения питания: трехфазный источник переменного напряжения (фазы A, B, C), трехфазный выключатель, осциллографы и виртуальную модель асинхронного электродвигателя. Блок трехфазного выключателя представляет собой три идеальных ключа, которые управляются таймером. Вентиляторная нагрузка на валу двигателя задается в виде уравнения (1), описывающего зависимость нагрузки от частоты вращения ротора.

$$M_c = M_{tp} + (M_{nom} - M_{tp}) \left(\frac{\omega}{\omega_{nom}} \right)^2, \quad (1)$$

где M_c – момент сопротивления, Н·м; M_{nom} – номинальный момент, Н·м; $M_{tp} = 0,25M_{nom}$ – момент трения, Н·м; ω_{nom} – номинальная угловая частота вращения ротора, рад/с; ω – переменная угловая частота вращения ротора, рад/с.

Угловая частота вращения ротора, изменяющаяся во времени, передается в реальном времени для определения текущего момента сопротивления.

Для перевода частоты вращения ротора из рад/с в об/мин исходное значение необходимо умножить на величину $30/\pi$.

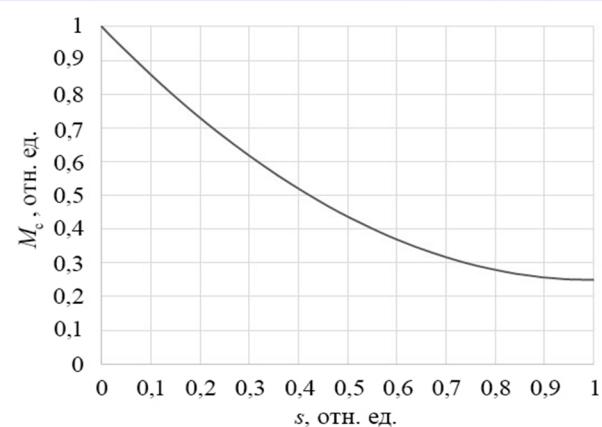


Рис. 2. Зависимость момента сопротивления насосного агрегата от скольжения

На рис. 2 изображена зависимость момента сопротивления M_c насосного агрегата от скольжения s в относительных единицах.

Параметры электродвигателя в составе насоса ЭЦВ 6-6, 3-85, необходимые для проведения моделирования, были рассчитаны на основе методик, описанных в [3, 4], и представлены в табл. 1.

Согласно методике [5] была построена кривая выбега двигателя с насосной частью (рис. 3). Данная кривая демонстрирует, что насосный агрегат полностью остановится спустя 0,48 секунды после отключения питания. Расчет времени выбега проводился на основе решения дифференциального уравнения (2) методом Эйлера. Уравнение имеет следующий вид:

$$M_c = T_j \frac{ds}{dt}, \quad (2)$$

где M_c – момент сопротивления, отн. ед.; T_j – электромеханическая постоянная времени, с; ds – приращение скольжения; dt – интервал времени, с.

Таблица 1

**Параметры погружного асинхронного двигателя
насоса ЭЦВ 6-6,3-85**

Параметры	Значения
Номинальная мощность P_n , кВт	2,8
Номинальное линейное напряжение U_n , В	380
Частота сети f , Гц	50
Активное сопротивление статора R_1 , Ом	1,53
Индуктивность рассеяния статора L_1 , мГн	5,28
Приведенное активное сопротивление ротора R_2 , Ом	1,2
Приведенная индуктивность рассеяния ротора L_2 , мГн	9,94
Взаимная индуктивность L_m , Гн	0,24
Суммарный момент инерции двигателя и нагрузки J_{Σ} , кг·м ²	0,0063
Коэффициент трения F , Нм·с	0,0023
Число пар полюсов p	1

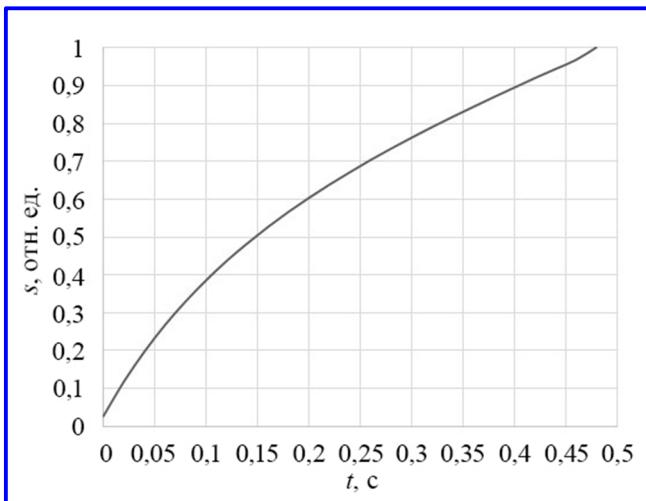


Рис. 3. Кривая выбега погружного электродвигателя

Прямой пуск электродвигателя осуществляется в течение 0,4 секунды, после чего происходит имитация аварийной ситуации, заключающаяся в отключении всех трех фаз от источника питания. Это достигается за счет открытия ключей, после чего восстанавливается напряжение путем замыкания ключей.

На рис. 4 представлены осцилограммы тока статора I_1 (А), электромагнитного момента M_s (Н·м) и частоты вращения ротора n_2 (об/мин) в зависимости от времени t (с) при длительности отсутствия питания 0,1 секунды.

На рис. 5 показаны осцилограммы тока статора I_1 (А), электромагнитного момента M_s (Н·м) и частоты вращения ротора n_2 (об/мин) в зависимости от времени t (с) при перерыве в подаче питания продолжительностью 0,45 секунды.

Амплитудное значение ударного тока при пуске составляет 69,7 А. Во время пуска двигатель дости-

гает своей номинальной частоты вращения за 0,24 секунды. Более быстрый пуск после восстановления питания обусловлен тем, что в момент времени восстановления напряжения ротор двигателя вращается.

Полученные осцилограммы демонстрируют, что процесс самозапуска прошел успешно и двигатель вышел на номинальный режим работы после восстановления питания. Осцилограммы тока статора показывают, что ток при самозапуске не превышает номинального значения, что также говорит об успешном самозапуске. Результаты осцилограмм подтверждают, что двигатель способен успешно восстановить свою работу после кратковременного отключения питания, что является критически важным для обеспечения непрерывности производственных процессов.

В табл. 2 показаны результаты моделирования, полученные при различных значениях продолжительности выбега.

По результатам моделирования можно сделать вывод, что с уменьшением продолжительности выбега насосный агрегат быстрее достигает номинальной частоты вращения при меньших значениях ударного тока.

В табл. 3 представлены отношения амплитуды ударного тока и длительности повторного пуска после восстановления питания к значениям, полученным при прямом пуске.

Таблица 2

Результаты моделирования

Параметры	Результаты			
Время выбега $t_{\text{выб}}$, с	0,1	0,2	0,3	0,45
Амплитудное значение ударного тока после восстановления напряжения $I_{\text{уд}}$, А	58,16	62,47	67,5	68,35
Частота вращения ротора в момент восстановления напряжения n_{2c} , об/мин	1845	1171	683	109
Длительность самозапуска t_c , с	0,144	0,17	0,185	0,21

Таблица 3

**Отношение значений параметров
при пуске и самозапуске**

Параметры	Значения			
Время выбега $t_{\text{выб}}$, с	0,1	0,2	0,3	0,45
Отношение ударного тока при самозапуске к ударному току при пуске $I_{\text{уд}}/I_{\text{п}}$, отн. ед.	0,83	0,89	0,97	0,98
Отношение длительности самозапуска к длительности пуска $t_c/t_{\text{п}}$, отн. ед.	0,6	0,71	0,77	0,88

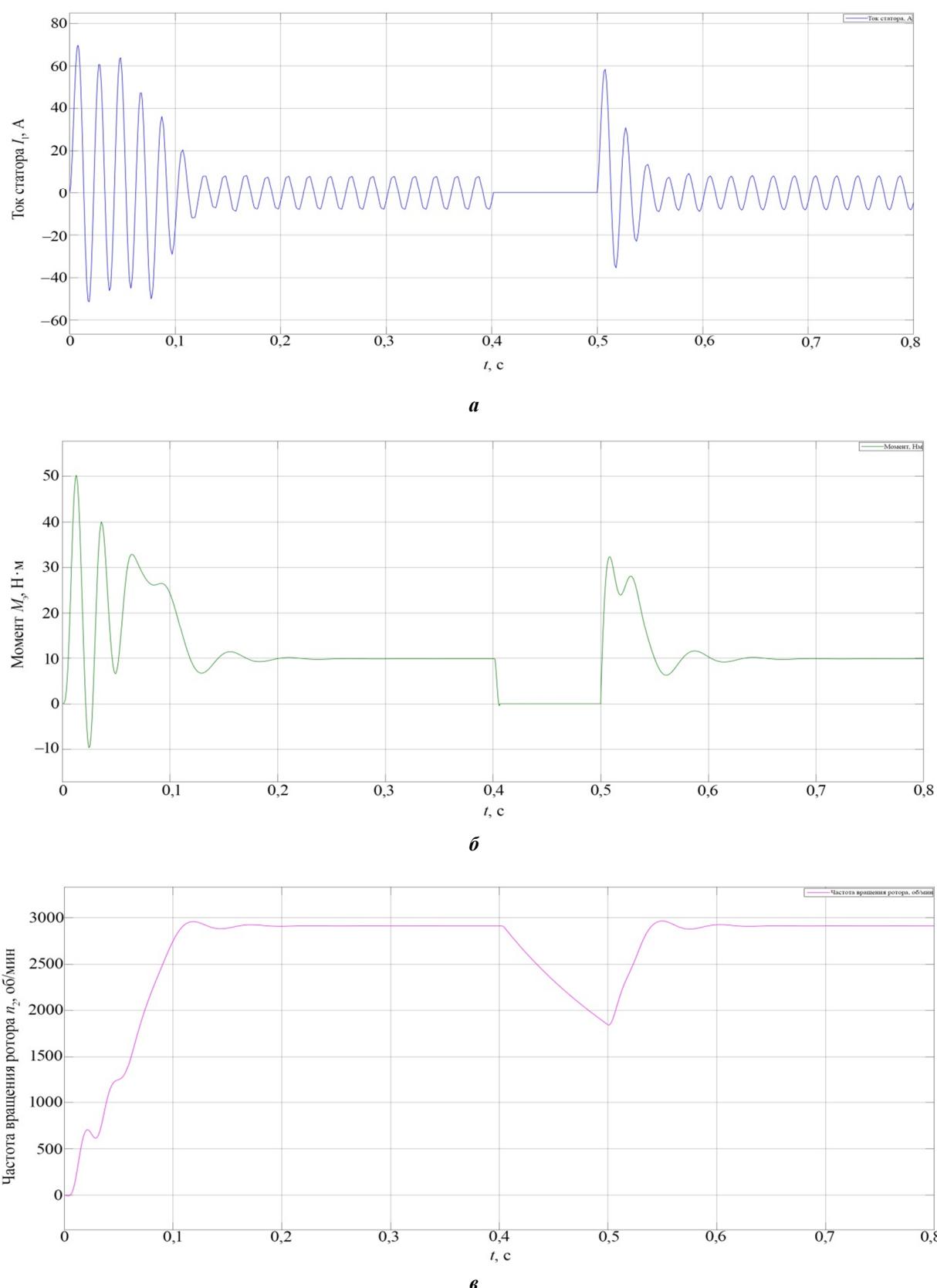


Рис. 4. Осциллограммы при самозапуске насосного агрегата с длительностью перерыва питания 0,1 с:
а – зависимость $I_1(t)$; *б* – зависимость $M_s(t)$; *в* – зависимость $n_2(t)$

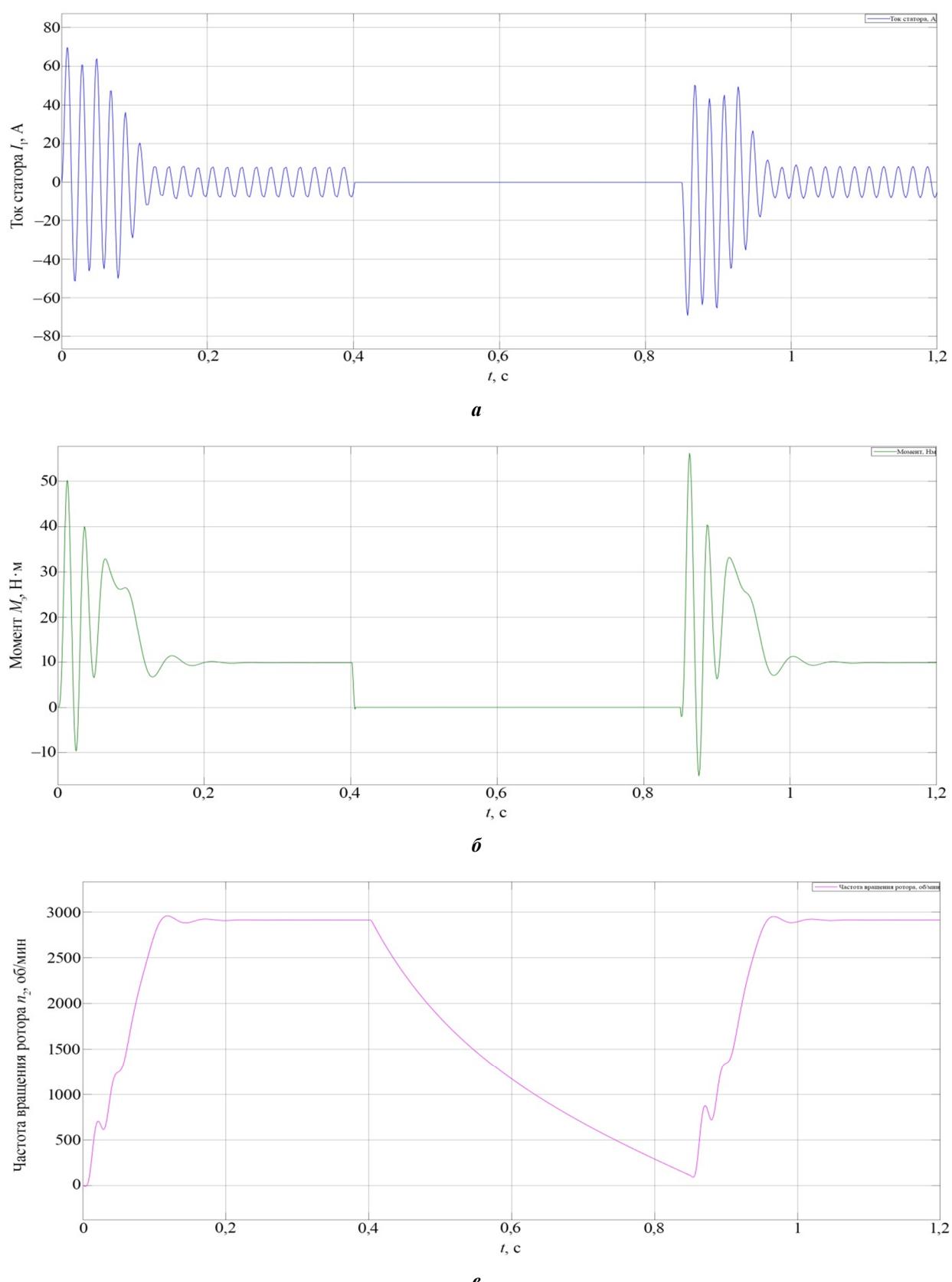


Рис. 5. Осциллограммы при самозапуске насосного агрегата с длительностью перерыва питания 0,45 с:
а – зависимость $I_1(t)$; *б* – зависимость $M_3(t)$; *в* – зависимость $n_2(t)$

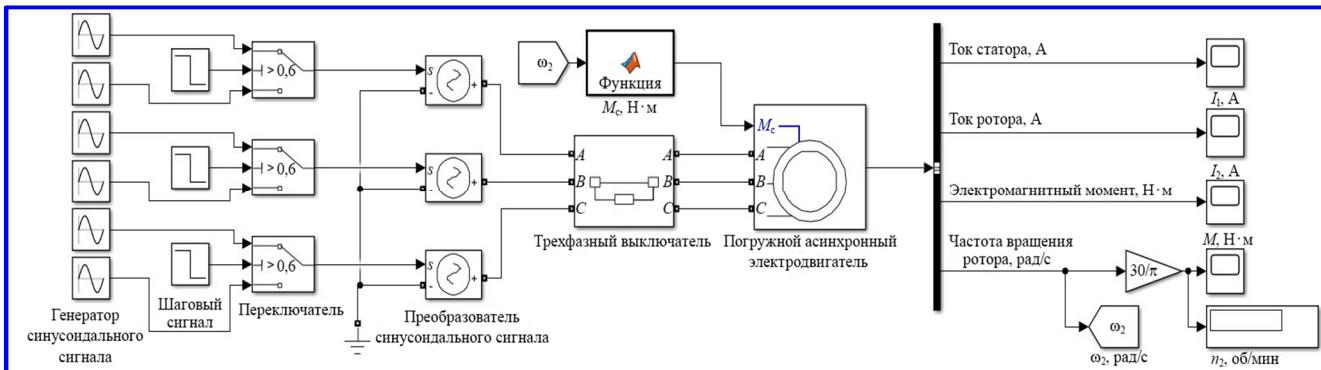


Рис. 6. Структурная схема модели, имитирующая самозапуск погружного асинхронного двигателя в составе электрического центробежного насоса для воды при изменении величины восстанавливющего напряжения

Анализ данных, представленных в табл. 3, показывает, что время выбега существенно влияет на амплитуду ударного тока и длительность повторного пуска погружного асинхронного электродвигателя. С увеличением времени выбега наблюдается рост отношения ударного тока при самозапуске к ударному току при пуске. Длительность самозапуска также увеличивается с ростом времени выбега.

В момент восстановления питания электродвигателя может возникнуть ситуация, когда наблюдается снижение напряжения на его зажимах. Это снижение приводит к уменьшению электромагнитного момента, что может негативно сказаться на процессе самозапуска. Чтобы исследовать процесс самозапуска при таких условиях, была доработана структурная схема модели (рис. 6).

В данной модели блок трехфазного источника переменного напряжения был заменен на генераторы синусоидального сигнала. Для реализации механизма переключения между источником номинального и пониженного напряжения использованы блоки переключатель и шаговый сигнал, последний из которых обеспечивает срабатывание переключателя в заданный момент времени. Также был добавлен блок, преобразующий синусоидальный сигнал в эквивалентный источник переменного напряжения.

В табл. 4 приведены отношения амплитуды ударного тока и длительности самозапуска при пониженном напряжении по сравнению со значениями, полученными во время прямого пуска при номинальном напряжении.

При значении $U_c/U_n = 0,38$ отн. ед. самозапуск становится невозможным. Это связано с тем, что величина момента сопротивления превышает электромагнитный момент двигателя во время повторного пуска и двигатель может оказаться в режиме короткого замыкания (КЗ).

Поступила в редакцию 27.11.2024

Алексей Алексеевич Кирякин, кандидат технических наук, ведущий инженер, доцент, т. +7 (903) 106-98-23, e-mail: KiriakinAA@mpei.ru.

Таблица 4

Отношение значений параметров при пуске и самозапуске при различном восстанавливающем напряжении

Параметры	Значения					
Отношение напряжения при самозапуске к номинальному напряжению U_c/U_n отн. ед.	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,38
Отношение ударного тока при самозапуске к ударному току при пуске I_{up}/I_p , отн. ед.	1,03	0,92	0,81	0,7	0,59	Режим КЗ
Отношение длительности самозапуска к длительности пуска t_c/t_p , отн. ед.	0,83	0,92	1,17	1,83	4,03	Режим КЗ

Заключение

Таким образом, разработанная имитационная модель погружного асинхронного двигателя с центробежным насосом позволяет исследовать процесс самозапуска и выбрать оптимальное время для настройки защитной аппаратуры, что имеет принципиальное значение для обеспечения надежной работы критически важных промышленных объектов.

Литература

- Голоднов, Ю. М. Самозапуск электродвигателей / Ю. М. Голоднов, А. Х. Хоренян. – Москва : Энергия, 1974. – 144 с.
- Сыромятников, И. А. Режимы работы асинхронных электродвигателей / И. А. Сыромятников. – Москва : Энергоиздат, 1955. – 303 с.
- Копылов, И. П. Проектирование электрических машин : учебник для бакалавров / Под ред. И. П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Юрайт, 2015. – 767 с.
- Счастливый, Г. Г. Погружные асинхронные электродвигатели / Г. Г. Счастливый, В. Г. Семак, Г. М. Федоренко. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 168 с.
- Эрнст, А. Д. Самозапуск асинхронных электродвигателей : учебное пособие / А. Д. Эрнст. – Омск : ОмГТУ, 2006. – 46 с.

Данила Андреевич Хнычев, магистрант, инженер, e-mail: danila.khnychiov@mail.ru.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»; Национальный исследовательский университет «МЭИ»).

STUDY OF TRANSIENT PROCESSES IN THE SELF-START MODE OF A SUBMERSIBLE INDUCTION ELECTRIC MOTOR DRIVING A PUMP

A. A. Kiryakin, D. A. Khnychev

The article studies the self-start mode of a submersible induction electric motor used in an electric centrifugal water pump. The purpose of the study is to develop a mathematical model of this motor as part of a water pump electric drive to analyze the self-start mode, assess the effect of the coasting time and the magnitude of the recovery voltage on transient processes. As part of the work, simulation modeling was carried out in the MATLAB Simulink environment, which made it possible to study parameters such as the amplitude of the shock current and the duration of self-start at different time intervals of no power supply, as well as at a reduced recovery voltage. The simulation results showed that the coasting time plays an important role in the self-start process. The article focuses on the importance of self-start for ensuring the continuity of pumping systems, especially under short-term interruptions in the power supply.

Key words: self-starting, induction electric motor, electric centrifugal water pump, transient processes, simulation modeling.

References

1. Golodnov, Yu. M. Self-starting of electric motors / Yu. M. Golodnov, A. Kh. Khorenyan. – Moscow : Energia, 1974. – 144 p.
2. Syromyatnikov, I. A. Operating modes of asynchronous electric motors / I. A. Syromyatnikov. – Moscow : Energoizdat, 1955. – 303 p.
3. Kopylov, I. P. Design of electrical machines: a textbook for bachelors / Edited by I. P. Kopylov. – 4th ed., revised and enlarged. – Moscow : Yurait, 2015. – 767 p.
4. Schastlivy, G. G. Submersible asynchronous electric motors / G. G. Schastlivy, V. G. Semak, G. M. Fedorenko. – Moscow : Energoatomizdat, 1983. – 168 p.
5. Ernst, A. D. Self-starting of asynchronous electric motors: a tutorial / A. D. Ernst. – Omsk : OmskGTU, 2006. – 46 p.

Aleksey Alekseevich Kiryakin, Candidate of Technical Sciences, lead engineer,
Associate Professor, t. +7 (903) 106-98-23, e-mail: KiriakinAA@mpei.ru.

Danila Andreevich Khnychev, master's student, engineer, e-mail: danila.khnychiov@mail.ru.
(JC «VNIIEМ Corporation»; National Research University «Moscow Power Engineering Institute»).