

УДК 621.313.333

EDN CXTRXJ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ПУСКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ОТ СУДОВОЙ СЕТИ

С.В. Попов

ORCID: 0009-0004-5274-2783 e-mail: yaporov3@ya.ru

Волжский государственный университет водного транспорта
*Нижний Новгород, Россия***О.А. Бурмакин**

ORCID: 0009-0003-4405-7674 e-mail: boa_71@mail.ru

Волжский государственный университет водного транспорта
*Нижний Новгород, Россия***В.В. Гуляев**

ORCID: 0009-0003-0092-8394 e-mail: eovt@mail.ru

Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, Россия

Рассмотрена проблема выбора мощности согласующего трансформатора при осуществлении трансформаторного пуска асинхронного электродвигателя (АД) от судовой сети. Предложена разработанная модель АД с параметрами реальной машины и проведен сравнительный анализ полученных при моделировании результатов. Приведена модель трансформаторного пуска АД от судовой сети и полученные при моделировании диаграммы основных параметров. Выполнен анализ переходных процессов при различных условиях пуска. Определены факторы, влияющие на переходные процессы разгона АД и на качество напряжения судовой сети. Сделаны выводы и даны рекомендации для усовершенствования модели с целью повышения точности моделирования.

Ключевые слова: судовая сеть, трансформаторный пуск, асинхронный электродвигатель, переходные процессы, схема моделирования.

Для цитирования: Попов С.В., Бурмакин О.А., Гуляев В.В. Моделирование трансформаторного пуска асинхронного двигателя от судовой сети // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 1. С. 36-45. EDN CXTRXJ

SIMULATION OF TRANSFORMER START-UP OF ASYNCHRONOUS MOTOR FROM SHIP'S NETWORK

S.V. Popov

ORCID: 0009-0004-5274-2783 e-mail: yaporov3@ya.ru

Volga State University of Water Transport
Nizhny Novgorod, Russia

O.A. Burmakin

ORCID: **0009-0003-4405-7674** e-mail: **boa_71@mail.ru**
Volga State University of Water Transport
Nizhny Novgorod, Russia

V.V. Gulyaev

ORCID: **0009-0003-0092-8394** e-mail: **eovt@mail.ru**
Volga State University of Water Transport
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The problem of choosing the power of a matching transformer when implementing transformer start-up of an asynchronous electric motor (AEM) from the ship network is considered. The developed model of AEM with the parameters of a real machine is proposed and a comparative analysis of the results obtained during modeling is carried out. The model of the transformer start-up of the AEM from the ship's network and the diagrams of the main parameters obtained during modeling are presented. The analysis of transient processes under various start-up conditions is carried out. The factors influencing the transient processes of AEM acceleration and the quality of the voltage of the ship's network are determined. Conclusions are drawn and recommendations are given for improving the model in order to increase the accuracy of modeling.

Keywords: ship network, transformer start-up, asynchronous electric motor, transients, simulation scheme.

For citation: S.V. Popov, O.A. Burmakin and V.V. Gulyaev, "Simulation of transformer start-up of asynchronous motor from ship's network", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 36-45, 2024. EDN CXTRXJ

I. Введение

При проектировании судовой системы электроснабжения необходимо учитывать как номинальную мощность установленного электрооборудования, так и режимы его работы [1]. К ним относятся: пусковые процессы, наброс и сброс нагрузки, стоянка под током и кратковременная перегрузка [2]. Кроме того, возникают проблемы выбора оборудования (палубных механизмов с электроприводом) с необходимой установленной мощностью из стандартного ряда мощностей, предлагаемых производством [3]. В некоторых случаях возникает вопрос подбора оборудования путем использования схожего по мощности оборудования из стандартного ряда, но с другим номинальным напряжением [4]. Для согласования величин напряжения проще всего использовать понижающий или повышающий (в зависимости от задачи) трансформатор [5]. Поскольку вопросы выбора согласующего трансформатора периодически возникают среди проектантов, задача определения параметров, схемы включения его обмоток с учетом режима работы электропривода, является актуальной [6].

II. Цель и задачи исследования

Наиболее простым способом исследования является моделирование, позволяющее получать диаграммы переходных процессов механических и электрических параметров системы. За базу модели был взят короткозамкнутый асинхронный трехфазный электродвигатель (АД) стандартной мощности 5,0 кВт с номинальным напряжением 380 В, для которого были рассчитаны активные и индуктивные сопротивления обмоток [7]. На рис. 1 приведена схема модели прямого пуска электродвигателя от сети бесконечной мощности, собранная в прикладном пакете *Matlab Simulink* [8]. Модель включает в себя трехфазный источник переменного тока *Three-Phase Programmable Voltage Source*, трехфазный выключатель *Three-Phase Breaker1*, сопротивление линии питания *R1*, электродвигатель *Asynchronous Machine SI Units* с возможностью задания нагрузки (вход *Tm*) в определенный момент времени, задаваемое блоком *Step2*.

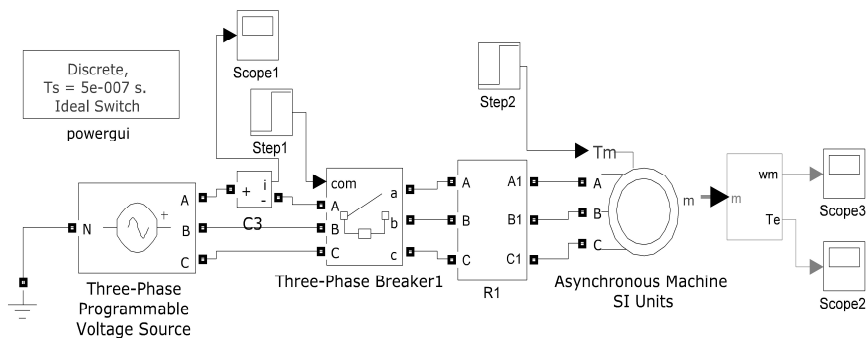


Рис. 1. Схема модели прямого пуска асинхронного двигателя от трехфазного источника большой мощности

Fig. 1. Diagram of a model of direct start of an asynchronous motor from a three-phase high-power source

III. Результаты исследования

В модель АД были введены расчетные параметры. Результаты моделирования прямого пуска двигателя приведены на рис. 2. На рис. 2а показана диаграмма изменения момента электродвигателя, который запустился в момент времени $t = 0,1$ с. Когда наступил установившийся режим работы электродвигателя на холостом ходу ($t = 1$ с), была приложена номинальная нагрузка ($t = 2,5$ с), и двигатель создал момент на валу, близкий к номинальному ($M_{ном} = 33,7$ Н·м). На рис. 2б приведена диаграмма изменения линейного тока одной фазы обмотки статора. Исходя из диаграммы, можно опре-

делить, что максимальное значение тока: при пуске составляет 130 А, холостого хода – 3 А, а установившегося при работе двигателя с нагрузкой – 12 А. Рис. 2в показывает изменение скорости двигателя, где время разгона двигателя до холостой частоты оборотов составляет 0,8 с, а время переходного процесса при набросе нагрузки 0,25 с. В соответствии с рис. 4 АД выходит на скорость холостого хода, а при подключении номинальной нагрузки – на номинальную скорость 152,7 рад/с.

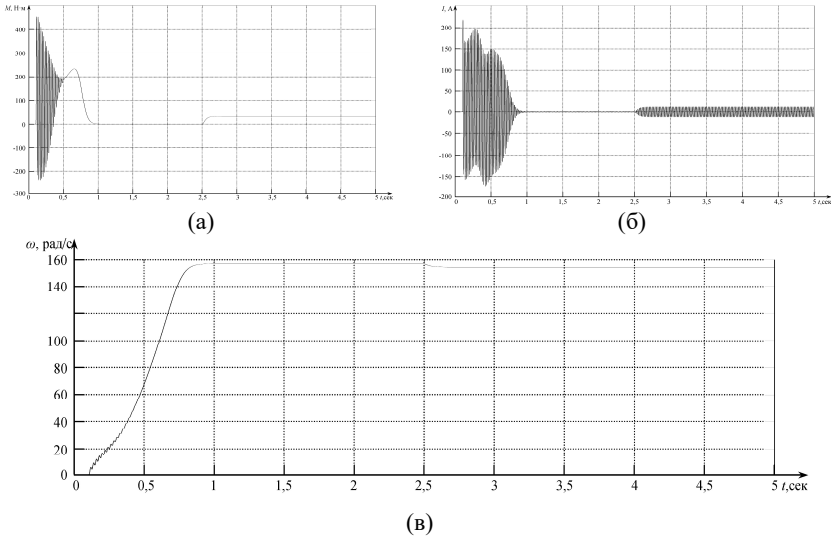


Рис. 2. Диаграммы изменения момента (а), тока (б) и скорости вращения (в) электродвигателя при прямом пуске

Fig. 2. Electric motor torque (a), current (b) and rotation speed (v) during direct start

В результате анализа переходных процессов можно сделать вывод, что модель АД адекватна, а значения пускового тока и момента соответствуют паспортным данным для этого электродвигателя. С целью определения оптимальных параметров трансформатора на базе модели АД была составлена модель трансформаторного пуска АД от судовой сети [5, 6]. На рис. 3 показана схема модели, которая состоит из: *Synchronous Machine* – генератора, *LLoad1* – активно-реактивной судовой нагрузки на генератор, *Three-Phase Transformer (Two Windings)* – трансформатора, *Asynchronous Machine* – асинхронного двигателя и *Three-Phase Breaker* – выключателей. Генератор мощностью 60 кВА имеет систему возбуждения и приводной двигатель, параметры которых задаются в зависимости от мощности дизель-генератора. Выключатели нагрузки получают сигнал на включение от

блоков Step, имеющих каждый свою уставку времени. По окончании процесса возбуждения генератора к нему подключается судовая нагрузка с полной мощностью 30 кВА и $\cos\phi = 0,8$.

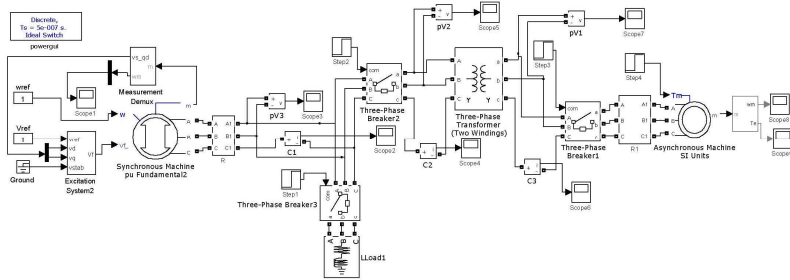


Рис. 3. Схема модели пуска асинхронного двигателя трансформаторным методом от нагруженного синхронного генератора

Fig. 3. Diagram of a model for starting an asynchronous motor by transformer method from a loaded synchronous generator

Впоследствии к загруженному генератору подключается трансформатор, работающий на холостом ходу. Мощность трансформатора составляет 17 % от мощности генератора, что примерно в два раза больше мощности электродвигателя АД палубного механизма, например, якорной лебедки ($P = 5$ кВт). Соотношения мощностей генератора и АД берутся приближенными, исходя из статистических данных для судов малого водоизмещения. После завершения переходных процессов, возникающих при пуске трансформатора, подключается АД, и уже после процесса разгона и выхода двигателя на скорость холостого хода подключается нагрузка. Диаграммы переходных процессов для последовательного подключения нагрузки, трансформатора и электродвигателя представлены на рис. 4 и 5.

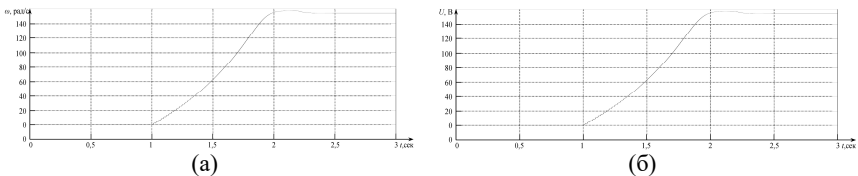


Рис. 4. Диаграммы изменения скорости вращения электродвигателя (а) и напряжения генератора (б) при последовательном подключении элементов схемы

Fig. 4. Electric motor rotation speed (a) and generator voltage (b) with series connected elements

Рис. 4а показывает разгон электродвигателя до скорости холостого хода ($\omega = 157$ рад/с) с последующим подключением номинальной нагрузки ($t = 2$ с). При этом скорость уменьшилась до номинального значения ($\omega_{\text{ном}} = 152,7$ рад/с). Для оценки влияния нагрузки на генератор на рис. 4б приведена диаграмма переходных процессов его напряжения. После возбуждения генератора к нему последовательно подключаются: активно-индуктивная нагрузка ($t = 0,1$ с), трансформатор ($t = 0,3$ с), электродвигатель ($t = 0,5$ с) и нагрузка на электродвигатель ($t = 2,0$ с). Каждое подключение сопровождается провалом напряжения генератора с наибольшим значением $\Delta U = 34$ В.

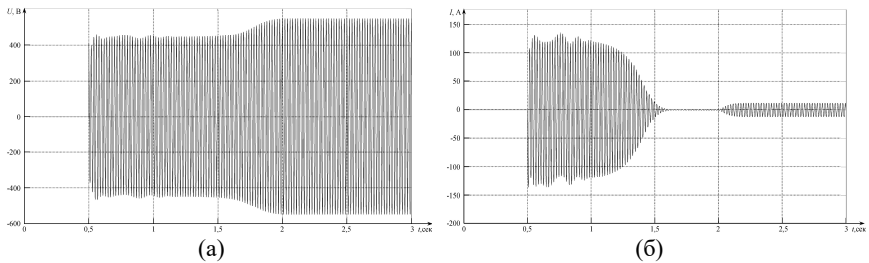


Рис. 5. Диаграммы изменения напряжения (а) и тока (б) на электродвигателе

Fig. 5. Electric motor voltage (a) and current (b)

На рис. 5а показано изменение линейного напряжения электродвигателя. При запуске электродвигателя, подключенного к вторичной обмотке трансформатора, возникает значительный провал напряжения – около 13,5 % от номинального значения. Поскольку трансформатор имеет внешнюю характеристику с наклоном 2,75 %, при пусковых значениях тока электродвигателя трансформатор входит в кратковременный режим перегрузки, значит, падение напряжения будет более 14 %. Это неизбежно приводит к затягиванию процесса его разгона. Из диаграммы рис. 5б видно, что ток электродвигателя достигает номинального по истечении 1,1 с после пуска. С целью определения влияния процесса пуска трансформатора на разгон электродвигателя АД была изменена последовательность подключения – сначала подключается АД без нагрузки к трансформатору, а после трансформатор к заранее нагруженному генератору. Диаграммы переходных процессов при этом показаны на рис. 6. Процесс разгона электродвигателя до скорости холостого (рис. 6а) составляет чуть более 1 с, а при набросе нагрузки скорость вращения снижается до номинальной. Для наблюдения за процессом изменения напряжения судовой сети было выполнено моделирование при подключении трансформатора и электродвигателя с нагрузкой на заранее нагруженный генератор. На рис. 7а показано, что переходный процесс, вызванный подключением трансформатора, продолжается в

течение 1,0 с. На рис. 7в показан разгон электродвигателя с нагрузкой, который достигает номинального значения скорости за 1,5 с. Переходный процесс напряжения генератора (рис. 7б) при этом практически повторяет диаграмму на рис. 4б, где провал напряжения составляет 11 % от номинального значения. Время переходного процесса составляет 1,5 с.

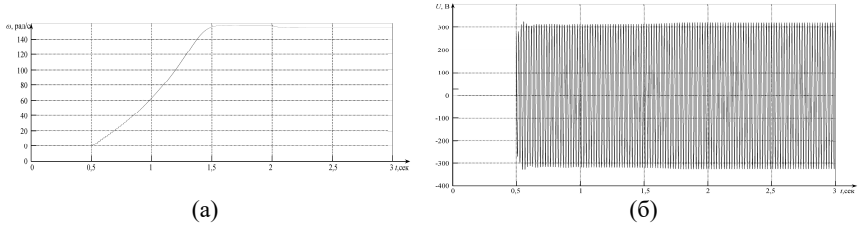


Рис. 6. Диаграммы изменения скорости вращения электродвигателя (а) и напряжения на первичной обмотке (б) трансформатора при включении трансформатора с подключенным электродвигателем без нагрузки

Fig. 6. Electric motor rotation speed (a) and voltage on the transformer primary winding (b) when the transformer is switched on with the connected electric motor without load

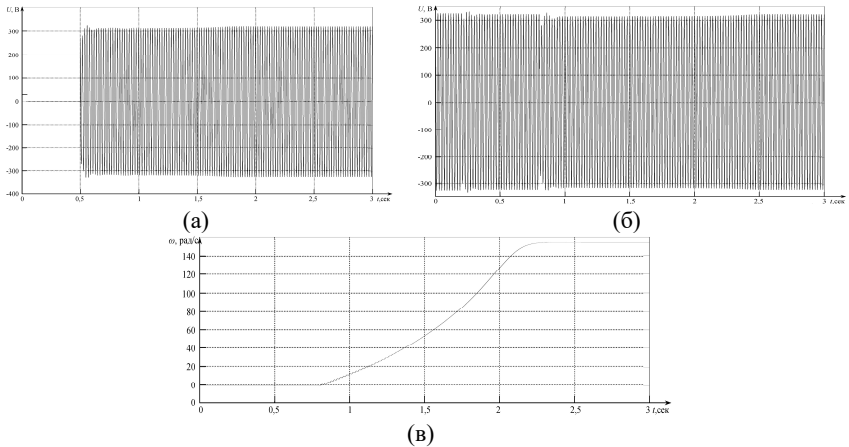


Рис. 7. Диаграммы изменения напряжения на первичной обмотке трансформатора (а), напряжения генератора (б) и скорости вращения электродвигателя (в) при включении трансформатора с подключенным электродвигателем с нагрузкой

Fig. 7. Voltage on the transformer primary winding (a), generator voltage and electric motor rotation speed when the transformer is switched on with a connected electric motor with a load

IV. Заключение

Исследования трансформаторного пуска электродвигателя методом моделирования показали влияние последовательности включения элементов схемы на качество переходных процессов, а главное, на время разгона электродвигателя [9]. В зависимости от соотношения мощностей электродвигателя, трансформатора и генератора судовой электростанции параметры переходных процессов будут меняться, а значит, в процессе моделирования возможно определить оптимальные параметры электрооборудования для выполнения пуска АД с минимальным воздействием на напряжение судовой сети [10]. Модель не учитывает изменение частоты напряжения при подключении электрической нагрузки к генератору, что неизбежно возникает в реальных судовых установках. В перспективе предложенная модель может быть расширена путем введения звеньев, учитывающих процессы судовой электростанции.

© Попов С.В., 2024

©Бурмакин О.А., 2024

© Гуляев В..В., 2024

Поступила в редакцию 29.06.2023

Принята к публикации 22.08.2023

Received 29.06.2023

Approved 22.08.2023

Библиографический список

- [1] Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Справочник по эксплуатации электроустановок промышленных предприятий. 7-е изд. М.: Форум, 2023. – 400 с.
- [2] Петушков М.Ю. Исследование трансформаторного пускового устройства асинхронных двигателей // Фундаментальные исследования. 2011. № 12-3. С. 584-586.
- [3] Кацман М.М. Электрические машины. Справочник. М.: КНОРУС, 2023. – 480 с.
- [4] Кобозев В.А. Электрические машины. М.: Инфра-Инженерия, 2022. – 480 с.
- [5] Маклиман В. Проектирование трансформаторов и дросселей. М.: ДМК, 2021. – 476 с.
- [6] Копылов И.П. Электрические машины. М.: Юрайт, 2024. – 268 с.
- [7] Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. М.: Корона-МГ, 2020. – 368 с.
- [8] Попов С.В., Гуляев В.В. Имитационная модель трансформатора для пуска асинхронного двигателя, Свид. прогр. для ЭВМ № 2019617390; опубли. 06.06.19.
- [9] Малышев Ю.С., Бурмакин О.А., Попов С.В. Имитационная модель пусковой установки по системе трансформатор-асинхронный двигатель для якорно-швартовных механизмов // Транспорт. Горизонты развития. 2022: Мат. Межд. научно-практ. форума. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». 2022. С. 30.

- [10] Малышев Ю.С., Бурмакин О.А., Попов С.В. Имитационная модель пусковой установки по системе трансформатор-асинхронный двигатель от судовой электростанции // Транспорт. Горизонты развития. 2022: Мат. Межд. научно-практ. форума. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». 2022. С.31.

References

- [1] U.D. Sibikin and M.U. Sibikin, *Spravochnik po ekpluatacii electroustanovok promyshlennyh predpriyatiy [Handbook on the operation of electrical installations of industrial enterprises]*, 7th ed. Moscow: Forum, 2023 (in Russian).
- [2] M.U. Petushkov, "Investigation of transformer starter of induction motors", *Fundamental research*, no. 12-3, pp. 584-586, 2011.
- [3] M.M. Kacman, *Electriccheskie mashiny. Spravochnik [Electric machines. Reference book]*. Moscow: KnoRus, 2023 (in Russian).
- [8] V.A. Kobozev, *Electriccheskie mashiny [Electric machines]*. Moscow: Infra-Engeneriya, 2022 (in Russian).
- [9] V. Mackliman, *Proektirovanie transformatorov i drossley [Design of transformers and chokes]*. Moscow: DМК, 2021 (in Russian).
- [10] I.P. Kopylov, *Electriccheskie mashiny [Electric machines]*. Moscow: Urait, 2024 (in Russian).
- [4] S.G. German-Galkin, *Matlab & Simulink. Proektirovanie mehatronnyh system na PC [Matlab & Simulink. Designing mechatronic systems on a PC]*. Moscow: Korona-MG, 2020 (in Russian).
- [5] S.V. Popov and V.V. Gulyaev, "Imitacionnaya model' transformatora dlya puska asinhronnogo dvigatelya [Simulation model of a transformer for starting an asynchronous motor]", Patent RU 2019617390, June 06, 2019 (in Russian).
- [6] U.S. Malyshev, O.A. Burvakin and S.V. Popov, "Imitacionnaya model' puskovoy ustanovi po sisteme transformator-asinhronniy gvigatel' dlya yakorno-shvartovnyh mehanizmov [Simulation model of the launcher according to the transformer-asynchronous motor system for anchor-mooring mechanisms]", in proc. conf. "Transport. Gorizonty razvitiya [Transport. Development horizons]", May 14-15, 2022, Nizhny Novgorod, Russia, pp. 31-32 (in Russian).
- [7] U.S. Malyshev, O.A. Burvakin, S.V. Popov, "Imitacionnaya model' puskovoy ustanovi po sisteme transformator-asinhronniy gvigatel' ot sudovoy electrostancii [Simulation model of a launcher based on a transformer-asynchronous motor system from a ship's power plant] in proc. conf. "Transport. Gorizonty razvitiya [Transport. Development horizons]", May 14-15, 2022, Nizhny Novgorod, Russia, pp. 32-33 (in Russian).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Попов Сергей Васильевич, кандидат технических наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Sergey V. Popov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Бурмакин Олег Анатольевич, кандидат технических наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Oleg A. Burmakin, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Гуляев Владимир Викторович, кандидат технических наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Vladimir V. Gulyaev, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.