

УДК 339.54.012

Баранов Никита Андреевич, бакалавр, 4 курса. ИЭТЭ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва.

Баннов Иван Алексеевич, бакалавр, 4 курса. ИЭЭ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва.

Воронин Ярослав Алексеевич, бакалавр, 4 курса. ИЭЭ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва.

Корнев Никита Андреевич, бакалавр, 4 курса. ИЭЭ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва.

МОДЕЛИРОВАНИЕ САМОЗАПУСКА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В НАСОСНОЙ СТАНЦИИ СИТЦЕНАБИВНОЙ ФАБРИКИ

Аннотация

В работе представлены результаты исследования динамических характеристик самозапуска высоковольтных асинхронных двигателей 6 кВ насосной станции ситценабивной фабрики. Актуальность темы обусловлена высокими требованиями к непрерывности технологического процесса подачи воды и растворов, кратковременное прекращение которого ведет к необратимому браку продукции. Исследование выполнено методом

имитационного моделирования в программной среде Engsee. Разработана физическая модель системы электроснабжения, включающая питающую сеть 110–35 кВ, трансформаторы, воздушные и кабельные линии, а также обобщенную нагрузку цехов. Верификация модели по контрольным точкам подтвердила ее достоверность (расхождение с расчетными данными не превышает 2–5 %). В ходе моделирования определены зависимости остаточного напряжения и частоты вращения двигателей от длительности перерыва питания. Установлено, что условием успешного самозапуска является непревышение напряжением на зажимах двигателей порога 0,7 о.е. в процессе разгона. Показано, что предельно допустимая длительность провала напряжения для рассматриваемой группы двигателей составляет 0,35 с, при этом скольжение выбега достигает 0,235, а практическое время разгона составляет 0,253 с. Полученные результаты позволяют обосновать выбор уставок релейной защиты минимального напряжения, настроек автоматического ввода резерва (АВР) и провести проверку совместимости заменяемого электрооборудования в системах с непрерывным циклом производства.

Annotation

The paper presents the results of a study of the dynamic characteristics of self-starting 6 kV high-voltage asynchronous motors of the pumping station of the print mill. The relevance of the topic is due to the high requirements for the continuity of the technological process of water and solutions supply, the short-term cessation of which leads to irreversible product defects. The study was carried out using the simulation modeling method in the Engsee software environment. A physical model of the power supply system has been developed, which includes a 110-35 kV power supply network, transformers, overhead and cable lines, as well as a generalized load of the workshops. Verification of the model using control points confirmed its accuracy (the discrepancy with the calculated data does not exceed 2-5%). During the simulation, the dependencies of the residual voltage and the rotational speed of the motors on the duration of the power interruption were determined. It was found

that the condition for successful self-starting is that the voltage at the motor terminals does not exceed the threshold of 0.7

Ключевые слова: Самозапуск электродвигателей, провал напряжения, остаточное напряжение, насосная станция 6 кВ

Keywords: Self-starting electric motors, voltage drop, residual voltage, 6 kV pumping station

Введение

В настоящее время промышленные предприятия характеризуются значительной долей электродвигательной нагрузки в составе системы электроснабжения. Весомая часть механизмов выполняется на базе высоковольтных асинхронных двигателей 6 кВ. К таким механизмам относятся насосные станции, обеспечивающие подачу технологической воды, циркуляцию растворов и противопожарное водоснабжение. Особенностью эксплуатации данных двигателей является то, что они остаются подключенными к питающей сети при кратковременных перерывах электроснабжения. В результате при восстановлении напряжения после аварии возникает режим самозапуска.

Кратковременные перерывы электроснабжения или глубокие просадки напряжения вызываются близкими короткими замыканиями, отключаемыми релейной защитой, либо оперативными переключениями, при работе АВР и АПВ. Продолжительность таких нарушений составляет от десятых долей до нескольких секунд. На это время двигатели переходят в режим выбега, снижая частоту вращения, на зажимах же сохраняется остаточная ЭДС, затухающая по мере уменьшения скорости. После восстановления напряжения высоковольтные двигатели должны без вмешательства персонала вернуться к нормальному режиму работы.

Для ситценабивной фабрики насосная станция обеспечивает подачу технологической воды и циркуляцию растворов на стадиях отварки, беления, крашения и отделки тканей. Даже кратковременное

прекращение подачи воды приводит к необратимому браку продукции и повреждению оборудования.

Самозапуск отличается от обычного пуска вращением двигателей с остаточной скоростью, что создает повышенный начальный момент. Затухающая ЭДС статора способна вызвать бросок тока, превышающий пусковой ток вплоть до двукратного. Разгон происходит под нагрузкой, вследствие чего увеличивается его длительность. В связи с этим, применения самозапуска требует обоснования. В реальных условиях электроснабжение после аварийного перерыва часто восстанавливается при сниженной мощности источника. В этом случае одновременный самозапуск нескольких электродвигателей может привести к провалам напряжения, перегреву обмоток и, в конечном счете, к неуспешному самозапуску и остановке ответственных механизмов.

Целью работы является исследование динамических характеристик самозапуска асинхронных двигателей 6 кВ насосной станции ситценабивной фабрики с помощью создания модели системы электроснабжения фабрики в среде динамического моделирования Engsee. Необходимо исследовать обеспеченность успешного самозапуска группы двигателей и оценить допустимую длительность перерыва питания. Для этих целей программная среда позволяет проверить потребляемый ток и время выбега, осуществить проверку самозапуска двигателей не только на стандартной паузе напряжения, но и при других возможных временах аварии. Так же есть функционал для построения кривых выбега и разгона.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанной модели и полученных результатов для обоснования выбора уставок защит минимального напряжения, настройки логики АВР и проверки совместимости новых или заменяющих двигателей в системе электроснабжения.

Моделирование процесса самозапуска

Для создания правильной физической модели проводилась поэтапная разработка, на каждом этапе которой контролировались параметры системы: ток, напряжение и мощность в различных узлах системы. На первом этапе были добавлены блоки, моделирующие систему, трансформатор системы, воздушную линию электропередачи, трансформатор главной понизительной подстанции фабрики, кабельная линия передачи нагрузки к насосной станции и кабельная линия к остальным цехам, которые представлены обобщенной нагрузкой. В каждый блок были занесены параметры номинального напряжения, мощности, активные и реактивные сопротивления. Некоторые параметры вносились в блоки программной среды в именованных единицах, а некоторые – в относительных. Так как схема имеет несколько уровней напряжений: 110 кВ, 35 кВ и 6 кВ, то и для расчета относительных величин необходимо использовать базисные значения напряжений. За базисные величины были приняты:

$$S_6 = 10 \text{ MVA}, U_{61} = 36,75 \text{ кВ}, U_{62} = 6,3 \text{ кВ}$$

Расчетные значения посчитаны в требуемом виде или взяты из паспорта оборудования и представлены ниже:

Система:

$$S_{кз} = 800 \text{ MVA}$$

$$\frac{X}{R} = 100$$

Трансформатор системы ТДТНГ-31500/110/35:

$$r_{ТВН} = r_{ТЧН} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta P_K \cdot S_6}{2 \cdot S_{НОМ}^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{255 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^6}{2 \cdot (31,5 \cdot 10^6)^2} = 0,00064$$

$$\begin{aligned} x_{ТВН} &= \frac{0,5 \cdot (u_{К(В-С)} + u_{К(В-Н)} - u_{К(С-Н)}) \cdot S_6}{200 \cdot S_{НОМ}} \\ &= \frac{0,5 \cdot (17,4 + 10,5 - 6,2) \cdot 10 \cdot 10^6}{200 \cdot 31,5 \cdot 10^6} = 0,0172 \end{aligned}$$

$$x_{\text{ТЧН}} = 0$$

$$x_{\text{ТНН}} = \frac{0,5 \cdot (u_{\text{К(В-С)}} + u_{\text{К(В-Н)}} - u_{\text{К(С-Н)}}) \cdot S_{\text{б}}}{200 \cdot S_{\text{НОМ}}}$$

$$= \frac{0,5 \cdot (17,4 + 10,5 - 6,2) \cdot 10 \cdot 10^6}{200 \cdot 31,5 \cdot 10^6} = 0,0172$$

Воздушная линия 35 кВ АС-120/19:

$$L_{\text{ВЛ}} = x_0 / \omega = 0,414 / 314 = 0,0132 \text{ Гн/км}$$

$$r_0 = 0,249 \text{ Ом/км}$$

Трансформатор ГПП ТМН-4000/35:

$$r_{\text{ГПП}} = \frac{\Delta P_{\text{к}} \cdot S_{\text{б}}}{2 \cdot S_{\text{НОМ}}^2} = \frac{33,5 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^6}{2 \cdot (4000 \cdot 10^3)^2} = 0,0105$$

Кабельные линии АСБЛ 50х3:

$$r_0 = 0,62 \text{ Ом/км}$$

$$x_0 = 0,09 \text{ Ом/км}$$

$$c_0 = 0,38 \text{ мкФ/км}$$

$$B = 2\pi f c_0 = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,38 = 119,4 \text{ мкСм/км}$$

Нагрузка цехов, помимо насосной станции, была сведена в один блок обобщенной нагрузки для упрощения схемы и ускорения работы симуляции. Значения нагрузок цехов были посчитаны методом коэффициента спроса и методом удельных нагрузок, значения же для блока получены, исходя из данных таблицы 3.1.

Таблица 3.1 – Нагрузки цехов для блока обобщенной нагрузки

№	Цех	Р _с , кВт	Q _с , квар	Р _о , кВт	Q _о , квар
1	Склад готовой продукции	12	9	5,94	1,47

2	Отбельный цех	792	207,84	36,86	9,12
3	Красильный цех	975	231,25	46,08	11,4
4	Котельная	385	288,75	5,02	1,24
5	Насосная	544	554,88	5,02	1,24
	Насосная 6 кВ	576	311,04	-	-
6	Механический цех	210	84,8	24,96	6,18
7	Склад оборудования и запасных частей	9	6,75	3,17	0,78
8	Лабораторный корпус	72	59,76	17	4,21
9	Столовая	94,5	45,36	13,91	3,44
10	Управление фабрики	31,5	19,53	12,53	3,1
11	Проходная	2,8	2,1	0,31	0,08
12	Медпункт	78	58,5	7,14	1,77
13	Гараж	16	16,32	2,43	0,6

Тогда, вся нагрузка, кроме высоковольтных двигателей, будет составлять:

$$P = \sum_{i=1}^{13} P_c + \sum_{i=1}^{13} P_o = 3402,17 \text{ кВт}$$

$$Q = \sum_{i=1}^{13} Q_c + \sum_{i=1}^{13} Q_o = 1629,47 \text{ квар}$$

В насосной станции стоят два двигателя 1BAO-450LB-4 У2,5. Их значения сопротивлений статора, ротора и контура намагничивания:

$$r_1 = 0,033$$

$$x_1 = 0,18$$

$$x_m = 6$$

$$r_2 = 0,022$$

$$x_2 = 0,19$$

В основные узлы схемы были включены измерительные блоки трехфазного тока и напряжения и блоки измерения активной и реактивной мощности. Также было подключено устройство компенсации реактивной мощности, которое находится на шинах ГПП НН. Вид схемы на данном этапе представлен на рисунках 3.1 и 3.2.

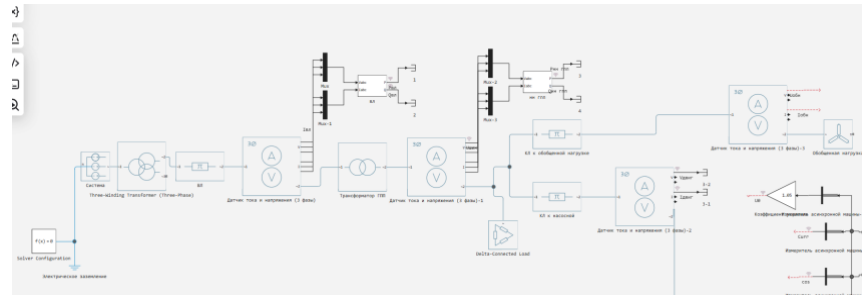


Рис. 3.1 – Часть схемы до двигателей насосной станции

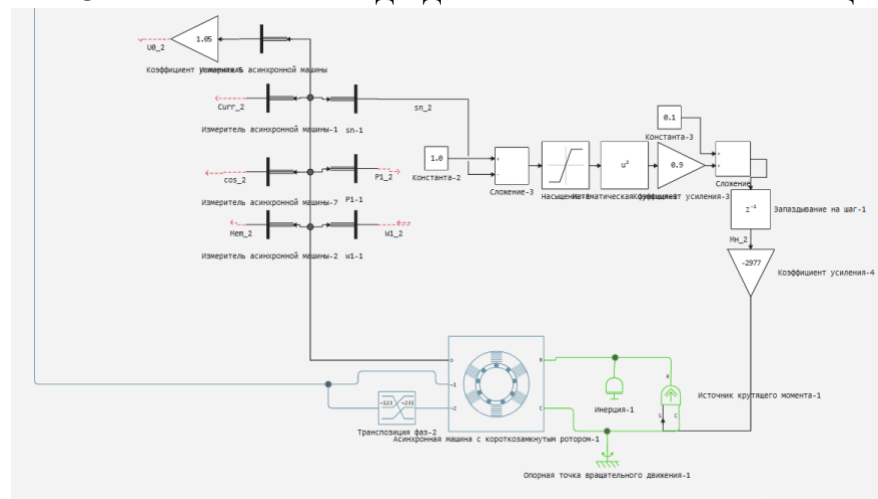


Рис. 3.2 – Модель двигателей насосной станции

После сборки модели была проведена проверка сравнения токов и напряжений в различных узлах системы с расчетными параметрами. Соответствие подтвердило правильность расчета значений сопротивлений элементов системы и корректность сборки. Незначительные отклонения могут объясняться упрощениями при теоретических расчетах и допусками на погрешность решателя.

На воздушной линии:

Расчетные параметры – $I = 75 \text{ A}$, $U = 38,5 \text{ кВ}$

Параметры в симуляции на рисунке 3.3

$$I = 98,35 / \sqrt{2} = 69,6 \text{ A}$$

$$U = 53953/\sqrt{2} = 38150 \text{ В}$$

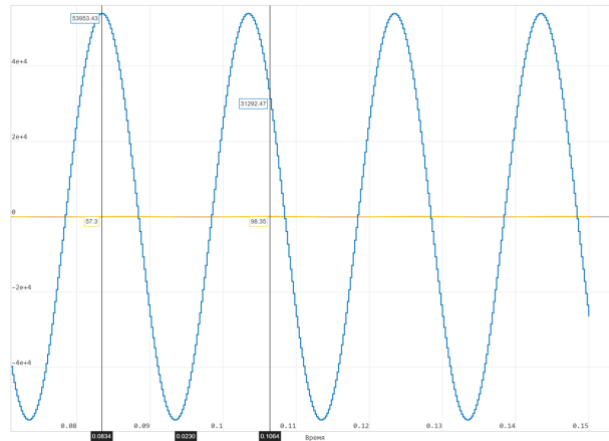


Рис. 3.3 – Значения тока и напряжения на ВЛ

На кабельной линии к насосной станции:

Расчетные параметры – $I = 63 \text{ А}$, $U = 6,3 \text{ кВ}$

Параметры в симуляции на рисунке 3.4

$$I = 89,37/\sqrt{2} = 63,2 \text{ А}$$

$$U = 8625/\sqrt{2} = 6099 \text{ В}$$

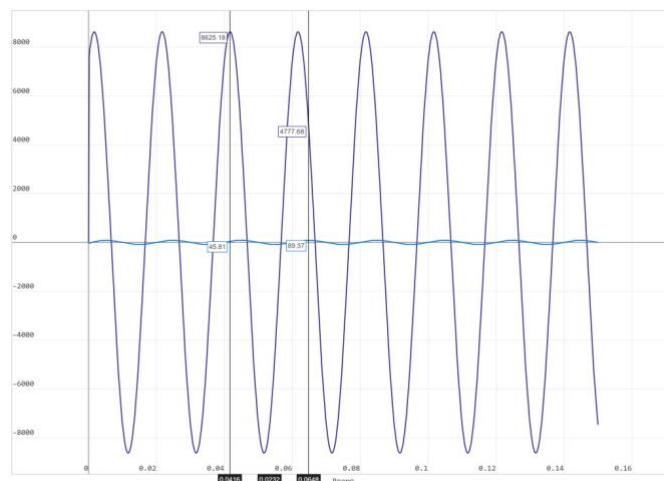


Рис. 3.4 – Значения тока и напряжения на КЛ насосной станции

На кабельной линии к нагрузке остальных цехов:

Расчетные параметры – $I = 367,52 \text{ А}$, $U = 6,3 \text{ кВ}$

Параметры в симуляции на рисунке 3.5

$$I = 511,58/\sqrt{2} = 361,74 \text{ А}$$

$$U = 8552,66/\sqrt{2} = 6047 \text{ В}$$

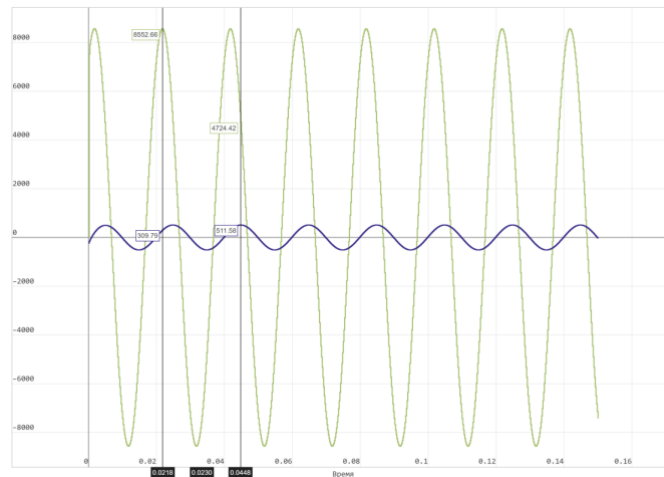


Рис. 3.5 – Значения тока и напряжения на КЛ нагрузки цехов

Так же было произведено сравнение номинальных параметров асинхронного двигателя с параметрами при запуске симуляции. Значения момента на валу, момента нагрузки, остаточного напряжения и скорости вращения выражаются в относительных единицах и достигают единицы, то есть, номинального значения за время пуска электродвигателей. Однако скольжение, коэффициент мощности и кратность пускового тока достигают значений, не совпадающих точно с номинальными параметрами. На рисунке 3.6 отображены эти параметры с помощью инспектора данных.

Номинальные параметры: $s = 0,007$; $\cos\varphi = 0,9$; $K_{\pi} = 6,5$;

Параметры в симуляции: $s = 0,017$; $\cos\varphi = 0,77$; $K_{\pi} = 5,89$;

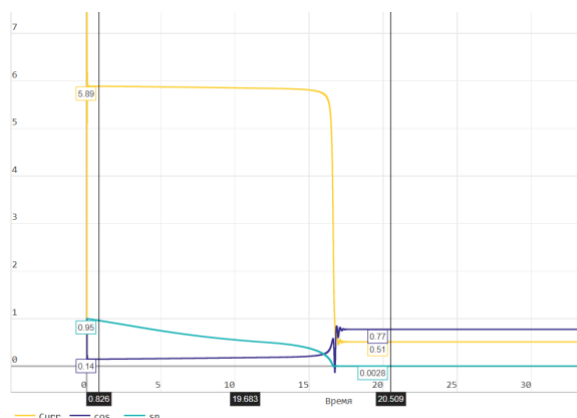


Рис. 3.6 – Параметры АД при пуске и при достижении номинальной скорости

На втором этапе проводилась оценка возможности самозапуска двигателей. Задача сводится к сравнению развиваемого двигателями электромагнитного момента с механическим моментом сопротивления после восстановления питания. В этом случае электромагнитный момент должен превышать механический момент сопротивления в 1,1 раза, то есть:

$$M_{эсэ} \geq 1,1M_{ссы}$$

Характеристика электромагнитного момента асинхронного двигателя от скольжения при изменяющемся напряжении на выводах может быть построена при помощи формулы:

$$m_a = \frac{(2 + q)m_M U_d^2}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s} + q}$$

Из выражения видно, что вращающий момент электродвигателя в процессе разгона пропорционален квадрату напряжения. Чтобы обеспечить условие превышения момента, остаточное напряжение на выводах двигателя должно быть больше определенного уровня. Допустив, что номинальный момент сопротивления составляет 0,8-0,85 пускового момента, предельное остаточное напряжение на зажимах двигателя в относительных единицах при котором возможен пуск, определяется:

$$U_0 = \sqrt{0,85/1} = 0,7$$

Тогда можно считать, что самозапуск будет успешным, если напряжение питания асинхронного двигателя в процессе разгона не ниже 70% от номинального.

Соответственно, нужно подобрать такое предельное время перерыва электроснабжения, при котором остаточное напряжение не опустится ниже, чем 0,7. На рисунке 3.7 видно, что при отключении питания на время $t = 0.35$ с напряжение опускается до требуемого значения.

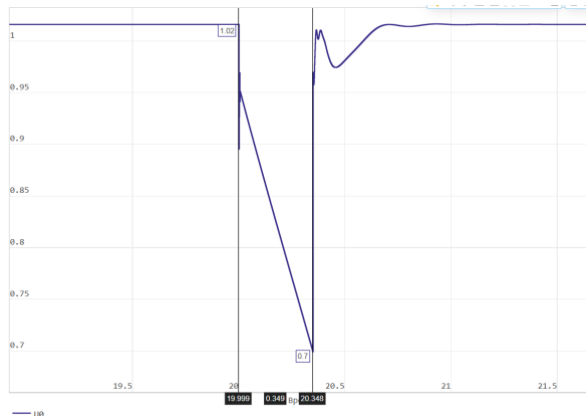


Рис. 3.7 – Остаточное напряжение на зажимах двигателей

Определенное время является предельно допустимым для перерыва в питании электродвигателей. Если перерыв окажется больше, то пропадет возможность самозапуска и придется ждать полной остановки двигателей, прежде чем снова подключать их к сети и производить пуск.

Так же была построена теоретическая зависимость выбега и разгона двигателя с помощью скрипта (Рис. 3.8). Для их построения использовались значения критического скольжения $s_{кр}$ и коэффициента q , полученные по выражениям:

$$s_{кр} = s_H \cdot \left(\lambda_{max} + \sqrt{\lambda_{max}^2 - 1} \right) = 0,007 \cdot \left(2,5 + \sqrt{2,5^2 - 1} \right) = 0,034$$

$$q = \frac{\left(s_{кр} + \frac{1}{s_{кр}} \right) \cdot \frac{\lambda_{пуск}}{\lambda_{max}} - 2}{1 - \frac{\lambda_{пуск}}{\lambda_{max}}} = \frac{\left(0,034 + \frac{1}{0,034} \right) \cdot \frac{1,3}{2,5} - 2}{1 - \frac{1,3}{2,5}} = 27,73$$

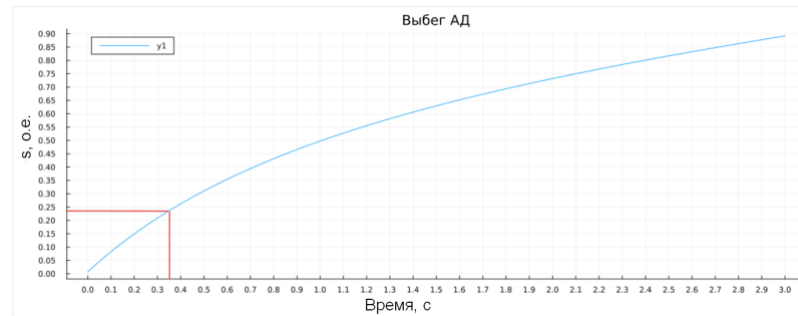


Рис. 3.8 – Теоретическая кривая разгона

Из кривой видно, что теоретически за время прекращения подачи напряжения скольжение асинхронного двигателя должно составлять $s = 0,235$. На основе этих данных был построен график разгона двигателя и остаточного напряжения (Рис. 3.9).

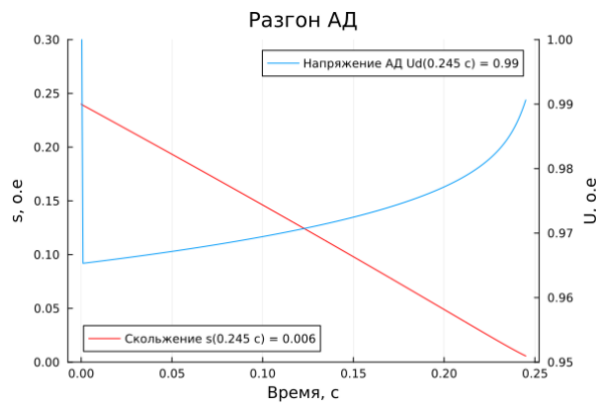


Рис. 3.9 – Разгон двигателей и остаточное напряжение

Исходя из построения, теоретическое время разгона составляет $t_{\text{теор}} = 0,245$ с. В симуляции же получилось время $t_{\text{прак}} = 0,253$ с, то есть сошлось с достаточной точностью.

Заключение

В ходе выполнения работы разработана физическая модель системы электроснабжения ситценабивной фабрики в среде динамического моделирования Engae, позволяющая исследовать переходные режимы самозапуска высоковольтных асинхронных двигателей 6 кВ насосной станции. Верификация модели путем сравнения токов и напряжений в контрольных узлах с расчетными параметрами подтвердила ее адекватность: отклонения не

превышают 2-5%, что допустимо с учетом упрощений при теоретических расчетах и погрешностей решателя.

Установлено, что успешность самозапуска определяется соотношением электромагнитного момента двигателя и момента сопротивления механизма после восстановления питания. Из анализа механических характеристик следует, что при снижении напряжения на зажимах двигателя ниже 70% от номинального развиваемый электромагнитный момент становится недостаточным для преодоления момента сопротивления ($M_{эс} < 1,1 M_{сс}$), что делает самозапуск неуспешным. Предельно допустимая длительность перерыва электроснабжения для рассматриваемой группы двигателей составляет 0,35 с — при этом остаточное напряжение снижается до 0,7 от номинального, а скольжение достигает значения $s = 0,235$, не превышая предельного.

Полученные результаты позволяют обоснованно выбирать уставки защит минимального напряжения и настраивать логику АВР, исключая ложные срабатывания при кратковременных провалах. При проектировании систем электроснабжения промышленных предприятий с насосными агрегатами 6 кВ необходимо учитывать, что самозапуск происходит при сниженной суммарной мощности источника питания, а появление остаточной ЭДС на шинах подстанции в процессе выбега приводит к увеличению пускового тока более чем в два раза, что должно учитываться при оценке тепловой нагрузки кабельных линий и селективности релейной защиты.

Список использованной литературы

- Стыскин А. В., Уразбахтина Н. Г. Моделирование и анализ возможности самозапуска асинхронных двигателей собственных нужд. — Донецк: ДонНТУ. — 15 с.
- Жилин Б. Б., Исаев А. С. Моделирование самозапуска асинхронного двигателя. — Донецк: ДонНТУ.
- Рогожкина А. В. Исследование группового самозапуска электродвигателей 6 кВ с помощью модели MATLAB/SIMULINK // Актуальные научные исследования в современном мире. — 2020. — № 6-1. — С. 265-273.
- Двойненко М. В., Шуин В. А. Исследование на имитационной модели параметров режима самозапуска электродвигателей комплексной нагрузки,

учитываемых при выборе уставок релейной защиты линий высокого напряжения // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2025. — Вып. 3. — С. 28-38.

EngEE. Запуск асинхронного двигателя по схеме «звезда-треугольник» [Электронный ресурс]. —

URL: https://engEE.com/helpcenter/stable/ru/interactive-scripts/power_systems/induction_machine_starting.html

СО 34.47.616. Методика расчета режимов перерыва питания и самозапуска электродвигателей 3-10 кВ собственных нужд электростанций упрощенными методами. — М.: СПО ОРГРЭС, 1993. — 56 с.

Сивокобыленко В. Ф., Лебедев В. К. Переходные процессы в системах электроснабжения собственных нужд электростанций: Учебное пособие. — Донецк: ДонНТУ, 2002. — 136 с.

Карпов Ф. Ф. Как проверить возможность подключения к электрической сети двигателей с короткозамкнутым ротором. — 3-е изд., перераб. и доп. — М., 1971. — 88 с.

Василив К. Н. Математическая модель режимов работы системы асинхронных двигателей дымососов тепловых электрических станций. — Донецк: ДонНТУ.

Славутский А. Л. Моделирование режима выбега и самозапуска асинхронного двигателя в составе узла комплексной нагрузки. — Донецк: ДонНТУ.

Лагутин В. М., Тепля В. В., Вишневский С. Я. Самозапуск двигателей собственных нужд электростанций. — М.: Энергоиздат, 1982. — 56 с.

ГОСТ Р 58353-2019. Системы электроснабжения промышленных предприятий. Нормы проектирования. — М. : Стандартинформ, 2019. — 34 с.