А.И. Исмоилов, А.С. Хисматуллин (Уфимский государственный нефтяной технический университет, филиал, г. Салават, Республика Башкортостан, Российская Федерация)

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НАСОСОВ ВОДОЗАБОРНОЙ СТАНЦИИ

Abdusami I. Ismoilov, Azat S. Khismatullin (Ufa State Petroleum Technological University, Branch, Salavat, Republic of Bashkortostan, Russian Federation)

SIMULATION OF THE POWER SUPPLY SYSTEM OF WATER INTAKE STATION PUMPS

Введение

Развитие электроэнергетики в последние годы характеризуется активным внедрением электронной аппаратуры в системах релейной защиты, режимной и противоаварийной автоматики. Однако электронная аппаратура, как правило, весьма чувствительна к помехам, появляющимся во вторичных цепях, источниками которых являются коммутационные аппараты, удары молний, токи короткого замыкания и т.д. С другой стороны, внедрение новой техники и технологий способствует ухудшению показателей качества электроэнергии, что приводит к снижению надежности электронной аппаратуры и резкому возрастанию отказов в работе или ложным срабатываниям.

Цели и задачи

Анализ влияния технического состояния электродвигателей на надежность системы электроснабжения.

Результаты

Установлены взаимосвязи технических параметров электродвигателей с параметрами высших гармонических составляющих токов и напряжений.

Background

The development of the electric power industry in recent years has been characterized by the active introduction of electronic equipment in relay protection systems, regime and emergency automation. However, electronic equipment, as a rule, is very sensitive to interferences that appear in secondary circuits, the sources of which are switching devices, lightning strikes, short-circuit currents, etc. On the other hand, the introduction of new equipment and technologies contributes to the deterioration of power quality indicators, which leads to a decrease in the reliability of electronic equipment and a sharp increase in failures in operation or false alarms.

Aims and Objectives

Analysis of the influence of the technical condition of electric motors on the reliability of the power supply system.

Results

The relationship between the technical parameters of electric motors and the parameters of the higher harmonic components of currents and voltages has been established.

Разработана математическая модель в среде MATLAB, использование которой позволяет проводить исследования работы электродвигателя при различных способах регулирования и разнообразных функциях нагружения асинхронного электропривода насосных агрегатов.

A mathematical model has been developed in the MATLAB environment, the use of which makes it possible to study the operation of an electric motor with various methods of regulation and various functions of loading an asynchronous electric drive of pumping units

Ключевые слова: моделирование; электроэнергия; электропривод; асинхронный двигатель; напряжение

Key words: simulation; electricity; electric drive; asynchronous motor; voltage

Введение

В настоящее время предприятия все чаще поднимают вопрос об аварийности различных агрегатов, в частности о техническом состоянии электрооборудования в целом [1-10]. Уровень безопасности низкий, что непосредственно связано со стареющим оборудованием, изношенностью машинных агрегатов, несвоевременными модернизацией производства и реконструкциями.

Один из возможных путей снижения риска возникновения чрезвычайных ситуаций на промышленных объектах - анализ состояния аварийности.

Анализ основных причин аварий, произведенный на основании дефектных ведомостей предприятий, произошедших на объектах химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей промышленности, позволил выделить основные группы причин (рисунок 1).

Рисунок 1. Статистические данные электрических повреждений электроприводов машинных агрегатов

Рассматривая машинные агрегаты, к которым можно отнести вентиляторы (воздушного охлаждения), насосы (дымососы), компрессоры и др., отметим, что основная часть имеет электрический привод.

В технологическом процессе промышленных предприятий некоторую часть (34 %) занимают машинные агрегаты [1-4]. На основе статистических данных установлено, что основную долю отказов всего оборудования составляют отказы машинных агрегатов, влияющих на надежность и работоспособность всего технологического комплекса. При эксплуатации машинных агрегатов большая нагрузка приходится на изоляцию, что связано с тяжелыми условиями работы, воздействием различных нагрузок (тепловых, механических, электрических) и недостаточной стабильностью электрических свойств изоляционных материалов, это вызывает уменьшение сопротивления изоляции, резкое снижение электрической прочности, а также рост диэлектрических потерь. Данные процессы способствуют потере механической прочности, гигроскопичности и, как следствие, происходит деградация изоляции.

Использование математического моделирования позволяет с определенной вероятностью говорить о процессах, протекающих в элементах систем электроснабжения с электродвигательной нагрузкой (СЭСЭН) и устройств комплексной защиты электродвигателей (УКЗЭ), исследование которых с помощью физического моделирования и проведения натурных испытаний может быть проблематичным и требует материальных и временных ресурсов.

Для целей моделирования наиболее целесообразным представляется использование цифровых ЭВМ с программным приложением, позволяющим решать системы неоднородных дифференциальных уравнений и в режиме реального времени изменять коэффициенты неизвестных. Анализ современных математических приложений показал преимущество программного пакета «MATLAB Release 13» перед подобными аналогами. Данный продукт содержит модуль Simulink, который позволяет решать необходимые системы уравнений, предварительно

приведя их к специальной неявной форме.

Создание математической модели системы «сеть - устройство комплексной защиты электродвигателей - асинхронный двигатель» разделено на несколько этапов. На первом этапе определяются допущения для каждого элемента системы. На втором этапе определяется схема замещения и создается модель для каждого элемента. На третьем этапе формируются функциональные связи элементов, и обобщается единая модель.

Разработка модели асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель (АД) является самым сложным элементом моделируемой системы в плане протекания электромеханических процессов. Модель АД является частным случаем обобщенного электромеханического преобразователя, суть которого основана на анализе комбинированного подхода, сочетающего теории поля и цепей.

При разработке модели применяются следующие допущения:

- не учитывается гистерезис магнитной системы двигателя;
- поле в воздушном зазоре имеет в общем случае эллиптическую форму, т.е. учитываются пространственные гармоники и несимметрия подводимого напряжения;
- ротор симметричен;
- обмотка статора соединена в изолированную «звезду»;
- уравнения записываются для заторможенной машины, т.е. обмотки ротора и статора неподвижны относительно друг друга;
- не учитывается наличие контуров вихревых токов и контуров короткозамкнутых витков;
- обмотка ротора представлена в виде «белой клетки».

При несинусоидальном несимметричном напряжении питания как первая, так и высшие гармоники имеют прямые и обратные поля. Поэтому в пространственной модели выделяются обмотки на статоре и роторе для прямого поля и обратного. В зазоре увеличивается число полей в математической модели - число уравнений, причем уравнения не изменяются, и остается выбрать те гармоники, влияние которых надо учесть.

Моделирование различных аварийных режимов осуществляется при помощи изменения коэффициентов либо функций в системе уравнений. Например, моделирование трехфазного короткого замыкания (КЗ) на выводах статорных обмоток производится путем приравнивания фазного напряжения в каждой фазе к 0. Режим выбега моделируется путем приравнивания фазных активных сопротивлений кабельной линии (КЛ) к бесконечно большой величине. Все остальные несимметричные режимы моделировались путем комбинаций приравнивания к 0 какой-либо фазы напряжения и приравнивания к бесконечности какого-либо фазного сопротивления.

Полученная модель АД позволяет моделировать следующие режимы:

- витковые замыкания обмотки статора, путем изменения сопротивления обмотки в одной из фазы АД;
- симметричные и несимметричные КЗ на выводах статорных обмоток;
- изменение механического момента на валу двигателя;
- питание двигателя несимметричным несинусоидальным напряжением.

При этом данные режимы могут моделироваться отдельно каждый и в комбинации с другими, что, однако, увеличивает время решения уравнений модели.

Математическая модель трансформатора тока

При моделировании трансформатора тока (ТТ) принималось допущения о том, что не учитывается гистерезисная кривая намагничивания. Моделирование непосредственно УКЗЭ и фильтра тока обратной последовательности (ФТОП) производилось также с использованием модуля Simulink, однако если для моделирования АД и ТТ первоначально записывалась система уравнений, а затем эта система решалась с использованием элементарных блоков, таких как интеграторы, сумматоры и т.д., то на данном этапе применялись уже готовые блоки электронных компонентов библиотеки SimPowerSystems. Преобразование сигнала из библиотеки элемен-

тарных блоков в библиотеку SimPowerSystems осуществлялось с использованием блока Controlled Voltage Source.

Падения напряжения вычитаются из напряжения источника питания и раскладываются сначала на гармонические, а затем на симметричные составляющие и после этого возвращаются в модель АД. Между тем, в модель ТТ и ФТОП поступает сигнал полных фазных токов, а выходные сигналы от этих моделей поступают в дата-файл, где накапливаются данные в матричной форме. Одной из строк такой матрицы является время. Модель электронного блока УКЗЭ решается отдельно от других моделей, т.к. их совместное решение приводит к значительному потреблению аппаратных ресурсов ЭВМ. Здесь описан один цикл функционирования модели. Длительность цикла задается в относительных или абсолютных величинах, в зависимости от способа решения дифференциального уравнения и топологии схемы УКЗЭ. Длительность цикла также может определяться автоматически, однако это может привести к некорректным результатам либо выходу модели из устойчивого состояния. Помимо моделирования таких процессов, как обрыв или перекос фазы, КЗ, несинусоидальность напряжения производилось моделирование коммутационных процессов. Для этого создавалась отдельная модель.

На рисунке 2 показана схема решающего блока модели сети при коммутации в модуле Simulink. При прохождении тока через 0 дуга гаснет, и сопротивление определяется сигналом 2. Контроль прохождения тока через нуль осуществляется блоком 3, который включают в себя триггерную часть и блок Hit crossing. Здесь описан один из блоков. Модель включает также блоки решения уравнений, описывающих трехфазную электрическую сеть, составленных на основании уравнений Кирхгофа, а также блок сравнения электрической прочности и восстанавливающего напряжения.

Полученная модель позволяет моделировать коммутационные процессы с учетом возникновения дуги, что улучшает достоверность результатов значений коммутационных перенапряжений.

Рисунок 2. Схема решающего блока модели при коммутации

Модель системы электроснабжения насосов водозаборной станции

Одной из задач при любом моделировании процессов в двигателе является определение параметров схемы замещения (СЗ) (рисунок 3).

Каждый изготовленный двигатель имеет соответствующие ГОСТ характеристики, которые приведены в каталогах. Эти данные можно представить следующим образом:

- режим номинальной мощности (100 %-ая нагрузка): линейное напряжение (U_n), ток статора (I_n), полезная мощность (P_{2n}), коэффициент полезного действия (КПД), коэффициент мощности ($\cos\phi$), скольжение (s_n), момент инерции двигателя (J);
- режим максимального момента: кратность максимального момента (K_M);

- режим КЗ (заторможенный ротор): кратности пускового момента (K_n), кратность пускового тока (K_i).

Рисунок 3. Схема замещения асинхронного двигателя

Кроме того, в каталогах приводятся энергетические показатели (КПД, $\cos\phi$) при нагрузке АД, равной 25 %, 75 %, 50 % и 125 % от номинальной. На основе этих данных и при допущениях, общепринятых в теории электрических машин, был составлен алгоритм расчета параметров схемы замещения асинхронной машины, который реализован в программе Matlab.

Разработанная методика позволяет с достаточной степенью точности определить параметры синхронной машины на основе каталожных данных. Погрешность расчета параметров не превосходит 15 %, что является вполне допустимым условием.

Порты модели A, B и C являются выводами статорной обмотки машины, а порты a, b и c - обмотки ротора машины. Порт Tm предназначен для подачи момента сопротивления движению.

Для удобства извлечения переменных машины из вектора в библиотеке Sim Power Systems предусмотрен блок Machines Measurement Demux. Модель асинхронной машины включает в себя модель электрической части, представленной моделью пространства состояний 4-го порядка и модель механической части в виде системы 2-го порядка (рисунки 4, 5).

Рисунок 4. Модель асинхронного двигателя

Рисунок 5. Блок AD

После введения всех данных параметров необходимо рассчитать модель.

Для этого запускается команда «Start simulation», и внизу программного окна можно будет наблюдать процесс расчета модели.

Во время процесса расчета, а также после его окончания можно просмотреть выходные переменные асинхронной машины.

Результаты моделирования

Для исследования влияния переходных режимов работы электропривода и влияния неисправных машинных агрегатов на показатели качества электроэнергии в системе электроснабжения было предложено разработать программную модель системы элек-

троснабжения в приложении Simulink среды MathLab. В ходе программного моделирования рассматривали два режима работы в системе электроснабжения:

- исследование влияния пуска мощного электродвигателя на показатели качества электроэнергии и на работу элементов системы электроснабжения;
- исследование влияния неисправного электродвигателя на показатели качества электроэнергии (ПКЭ) системы электроснабжения.

Для решения поставленной задачи и изучения процессов, происходящих в системе электроснабжения, была разработана модель системы электроснабжения, принципиальная схема которой представлена на рисунке 6.

Рисунок 6. Принципиальная схема модели системы электроснабжения

В электрических линиях с распределенными параметрами активное сопротивление и индуктивности проводников являются продольной составляющей, а в качестве поперечной составляющей выступают проводимости изоляционных материалов, которые образуются вследствие дефектов изоляции и емкостной составляющей параллельных проводников линии.

Выводы

1. Проведены исследования внешних воздействий в СЭСЭН. Установлено, что среднее значение наиболее вероятных кратностей перенапряжения находится в диапазоне 3,8-4,2; коэффициент несимметрии по обратной последовательности - в диапазоне 1,9-3,9; а коэффициент несинусоидальности - в диапазоне 9-28.

2. Разработана математическая модель

системы «электрическая сеть-УКЗЭ-АД», позволяющая исследовать различные электромеханические процессы с учетом несимметрии питающего напряжения, наличия гармонических составляющих, изменения момента на валу электродвигателя, насыщения ТТ, обрыва фаз, симметричных и несимметричных КЗ, витковых замыканий обмотки статора.

3. Получены зависимости влияния времени разновременности размыкания контактов одной из фаз, относительно двух других, низковольтной коммутационной аппаратуры на уровни перенапряжений при отключении пускового тока АД и при установившемся режиме работы АД различной номинальной мощности и различных длинах питающего кабеля. Рекомендуемый норматив времени разновременности размыкания контактов составляет не более 0,005 с.

Список литературы

1. Bashirov M.G., Khismatullin A.S., Sirotina E.V. Cooling System Oil-Immersed Transformers with the Use of a Circulating Sulfur Hexafluoride // *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2020. Vol. 641 LNEE. P. 613-621. DOI: 10.1007/978-3-030-39225-3_67.
2. Vasilev I., Hismatullin A. The Theory of Fuzzy Sets as a Means of Assessing the Periods of Service of Asynchronous Electric Motors // *Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM): Proceedings 2020 International Conference*. Sochi, Russia, 2020. Article Number 9111887. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111887.
3. Vildanov R.G., Khismatullin A.S., Luneva N.N. Economic Aspects of Reactive Power Compensation at Gas-Chemical Plant // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 560. Article Number 012108. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012108.
4. Khismatullin A.S. Method for Increasing Oil Resources Transformers with Longterm Operation // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 327. Issue 2. Article Number 022058. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022058.
5. Khismatullin A.S., Sirotina E.V., Bakirov R.R., Karimov Sh.D. Diagnostic System to Monitor the Transformer with the Automated Control System // *Components of Scientific and Technological Progress*. 2020. No. 9 (51). P. 10-13.
6. Баширов М.Г., Хисматуллин А.С., Прахов И.В. Повышение надежности и безопасности эксплуатации силовых маслонаполненных трансформаторов // *Безопасность в техносфере*. 2018. Т. 7. № 2. С. 15-21. DOI:

References

1. Bashirov M.G., Khismatullin A.S., Sirotina E.V. Cooling System Oil-Immersed Transformers with the Use of a Circulating Sulfur Hexafluoride. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2020, Vol. 641 LNEE, pp. 613-621. DOI: 10.1007/978-3-030-39225-3_67.
2. Vasilev I., Hismatullin A. The Theory of Fuzzy Sets as a Means of Assessing the Periods of Service of Asynchronous Electric Motors. *Proceedings 2020 International Conference «Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)»*. Sochi, Russia, 2020, Article Number 9111887. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111887.
3. Vildanov R.G., Khismatullin A.S., Luneva N.N. Economic Aspects of Reactive Power Compensation at Gas-Chemical Plant. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 560, Article Number 012108. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012108.
4. Khismatullin A.S. Method for Increasing Oil Resources Transformers with Longterm Operation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, Vol. 327, Issue 2, Article Number 022058. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022058.
5. Khismatullin A.S., Sirotina E.V., Bakirov R.R., Karimov Sh.D. Diagnostic System to Monitor the Transformer with the Automated Control System. *Components of Scientific and Technological Progress*, 2020, No. 9 (51), pp. 10-13.
6. Bashirov M.G., Khismatullin A.S., Prakhov I.V. Povyshenie nadezhnosti i bezopasnosti ekspluatatsii silovoykh maslonapolnennykh transformatorov [Increasing of Power Oil-Filled Transformers' Operation Reliability and Safety].

10.12737/article_5c35cc6e2354f7.79418159.

7. Муллакаев М.С., Муллакаев Р.М., Хисматуллин А.С. Технико-экономическое обоснование проекта «сонохимическая технология и комплекс очистки нефтезагрязненных стоков» // Современная научная мысль. 2020. № 5. С. 136-141. DOI: 10.24412/2308-264X-2020-5-136-142.

8. Муллакаев М.С. Современное состояние проблемы извлечения нефти // Современная научная мысль. 2013. № 4. С. 185-191.

9. Хисматуллин А.С., Вахитов А.Х., Феоктистов А.А. Исследование теплопереноса в промышленных силовых трансформаторах с элегазовым охлаждением под воздействием вибрации // Успехи современного естествознания. 2015. № 12. С. 173-176.

10. Хисматуллин А.С., Гареев И.М. Расчет трехмерного температурного поля в силовых масляных трансформаторах с элегазовым охлаждением // Фундаментальные исследования. 2015. № 10-3. С. 534-537.

Bezopasnost' v tekhnosfere - Safety in Technosphere, 2018, Vol. 7, No. 2, pp. 15-21. DOI: 10.12737/article_5c35cc6e2354f7.79418159. [in Russian].

7. Mullakaev M.S., Mullakaev R.M., Khismatullin A.S. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie proekta «sonokhimicheskaya tekhnologiya i kompleks ochistki neftezagryaznennykh stokov» [Technical-Economic Substantiation of the Project «Sonochemical Technology and the Complex for Treatment of Oil-Contaminated Wastes»]. *Sovremennaya nauchnaya mysl' - Modern Scientific Thought*, 2020, No. 5, pp. 136-141. DOI: 10.24412/2308-264X-2020-5-136-142. [in Russian].

8. Mullakaev M.S. Sovremennoe sostoyanie problemy izvlecheniya nefti [Current State of Oil Recovery]. *Sovremennaya nauchnaya mysl' - Modern Scientific Thought*, 2013, No. 4, pp. 185-191. [in Russian].

9. Khismatullin A.S., Vakhitov A.Kh., Feoktistov A.A. Issledovanie teploperenosa v promyshlennykh silovykh transformatorakh s elegazovym okhlazhdeniem pod vozdeystviem vibratsii [Investigation of Heat Transfer in Industrial Power Transformers Gas Cooling the Effect of Vibration]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya - Advances in Current Natural Sciences*, 2015, No. 12, pp. 173-176. [in Russian].

10. Khismatullin A.S., Gareev I.M. Raschet trekhmernogo temperaturnogo polya v silovykh maslyanykh transformatorakh s elegazovym okhlazhdeniem [Calculation of Three-Dimensional Temperature Fields in Oil Transformers with Gas-Cooled]. *Fundamental'nye issledovaniya - Fundamental Research*, 2015, No. 10-3, pp. 534-537. [in Russian].

Авторы

• Исмоилов Абдусами Илхомджонович
Уфимский государственный нефтяной
технический университет, филиал, г. Салават
Студент кафедры «Электрооборудование
и автоматика промышленных предприятий»
Российская Федерация, 453265, г. Салават,
ул. Губкина, 22Б
e-mail: hism5az@mail.ru

• Хисматуллин Азат Салаватович, канд. физ.-мат.
наук
Уфимский государственный нефтяной
технический университет, филиал, г. Салават
Доцент кафедры «Электрооборудование
и автоматика промышленных предприятий»
Российская Федерация, 453265, г. Салават,
ул. Губкина, 22Б
e-mail: hism5az@mail.ru

The Authors

• Ismoilov Abdusami I.
Ufa State Petroleum Technological University,
Branch, Salavat
Student of Electrical Equipment
and Automation of Industrial Enterprises Department
22B, Gubkin str., Salavat, 453265,
Russian Federation
e-mail: hism5az@mail.ru

• Khismatullin Azat S., Candidate of Physical
and Mathematical Sciences
Ufa State Petroleum Technological University,
Branch, Salavat
Assistant Professor of Electrical Equipment
and Automation of Industrial Enterprises Department
22B, Gubkin str., Salavat, 453265,
Russian Federation
e-mail: hism5az@mail.ru