

# Проектирование компрессоров в среде *SimulationX* от *ESI ITI*

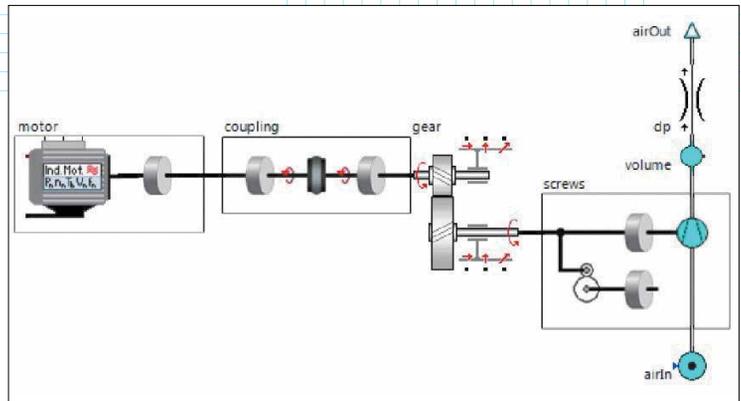
© 2020 ГК "ГЛМ Урал"

В проектировании компрессоров появилось новое направление, основанное на имитационном моделировании, при котором каждая часть компрессорной установки анализируется и оптимизируется при помощи имитационной модели. Увеличение инженерных усилий на ранних этапах проектирования позволяет сократить сроки проектирования и затраты, связанные с внесением изменений в конструкцию на поздних этапах разработки. В авангарде этого направления расположился *SimulationX* – инструмент имитационного моделирования, который используют в качестве основы для имитационного проектирования в силу его универсальности.

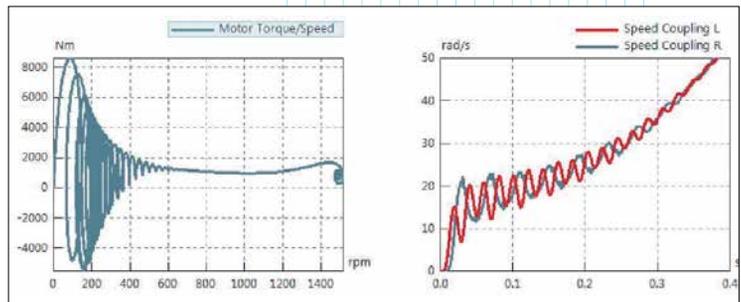
Ключевым фактором при выборе программного обеспечения для проектирования компрессоров на основе имитационного моделирования является наличие возможности расчета мультифизических систем. В компрессоре пневматическая, электромеханическая системы и алгоритмы их управления взаимодействуют друг с другом настолько тесно, что специальные инструменты, работающие исключительно с одной подсистемой, неточно отображают физическое поведение реального устройства. Примером такого взаимодействия между подсистемами является определение вибраций, возникающих в приводе компрессора из-за пульсаций давления.

На *рис. 1* показана простая модель пневматической и электромеханической систем винтового компрессора. Каждая механическая часть представлена инерционным элементом с соответствующим моментом инерции. Массы разделены упругими или демпфирующими элементами, которые вычисляют жесткость соединения между ними. В элементе редуктора учитывается жесткость зубьев и боковой зазор, в элементах компрессора и объема воздуха вычисляются колебания давления, вызванные подачей воздуха и повышением температуры в результате сжатия.

Модель используется для вычисления собственных частот системы или определения крутящих моментов, которые испытывает двигатель при запуске. На *рис. 2* приведены результаты расчета во время запуска двигателя, при котором для достижения номинальной частоты вращения в 1500 об/мин требуется порядка 1.5 секунды. На графике слева отображена зависимость момента вращения на валу двигателя от его частоты вращения. Эластичность муфты приводит к колебаниям между положительным и отрицательным



*Рис. 1. Модель винтового компрессора в SimulationX*



*Рис. 2. Результаты расчета при запуске двигателя*

Element	Energie/Leistung
<b>Kinetische Energie</b>	<b>Summe: 1.0573</b>
motor.rotor_inertia	0.1649
coupling.inertia_coupling2	0.0204
screws.inertia_kompressor	0.6624
screws.inertia_kompressor_	0.1988
<b>Potenzielle Energie</b>	<b>Summe: 1.0360</b>
coupling.coupling1	1.0000
gear (tooth contact, right fl	0.0360

*Рис. 3. Распределение энергии при собственной частоте в 41 Hz*

крутящим моментом, которые уменьшаются после того, как двигатель достигает частоты вращения более 600 об/мин. На графике справа показана разность фаз левой и правой сторон муфты. В этом случае причиной колебаний, показанных на диаграммах, является процесс запуска асинхронного двигателя.

Результаты моделирования помогают инженеру определить правильный размер двигателя и позволяют поэкспериментировать с выбором различных муфт для определения эффекта при смещении собственных частот. На *рис. 3* отображается распределение энергии в модели, показанной на *рис. 1* для собственной частоты 41 Hz. Пропорционально высокое значение потенциальной энергии в элементе

*coupling.coupling1* показывает, что уменьшение его собственной частоты может быть достигнуто при использовании более мягкой связи. Это благоприятно скажется на процессе запуска двигателя, так как он подключен к электрической сети переменного тока с частотой 50 Hz.

В процессе сжатия воздуха значительная часть механической энергии вращения ротора компрессора преобразуется в тепловую энергию, которую необходимо отводить в окружающую среду при помощи системы охлаждения. В зависимости от мощности компрессора, система охлаждения будет иметь различные комплектацию и систему управления. На рис. 4 показана упрощенная модель замкнутой системы водяного охлаждения поршневого компрессора, спроектированная в среде *SimulationX*.

Тепло в данной модели передается от сжатого воздуха, проходящего в межтрубном пространстве водо-воздушного теплообменного аппарата, протекающей в трубах данного аппарата воде, которая далее направляется по трубопроводу в резервуар. Центробежный насос забирает воду из резервуара, а затем она вновь направляется в водо-воздушный теплообменный аппарат или, в зависимости от температуры воды, байпасируется термодатчиком. Охлажденная вода снова поступает в теплообменный аппарат для отвода тепла от сжатого воздуха.

Результатами данного моделирования будут значения давления и температуры, а также потоков энергии в отдельных компонентах системы, зависящие от объемных расходов воды и воздуха, проходящих через теплообменный аппарат. Влияние повышенных нагрузок и условий окружающей среды на систему могут быть смоделированы на этапе разработки. Результаты моделирования помогут инженеру при проектировании и определении размеров отдельных компонентов системы охлаждения. Имитационная модель позволяет определять

и оптимизировать потребление энергии компонентами системы.

Другим распространенным примером применения имитационного моделирования является создание и испытание кода контроллеров. В этом случае контроллер (или модель контроллера) подключается к виртуальной установке, то есть к имитационной модели компрессора.

Такая возможность существенно упрощает разработку и тестирование программного кода контроллера до момента ввода оборудования в эксплуатацию. Испытания программного кода воспроизводимы и могут быть автоматизированы, а в случае ошибок в работе контроллера или возникновении аварийных ситуаций при тестировании удастся избежать повреждений реального оборудования.

Для разработки кода контроллера используются три технологии, далее опишем их более подробно.

✓ **Model in the Loop – модель в контуре управления**

Создается имитационная модель контроллера, которая воздействует непосредственно на имитационную модель системы.

✓ **Software in the Loop – ПО в контуре управления**

Реальный программный код контроллера воздействует непосредственно на имитационную модель системы.

✓ **Hardware in the Loop – оборудование в контуре управления**

Программный код контроллера работает на собственной аппаратной платформе и связывается с имитационной моделью системы посредством физических сигналов. Сама имитационная модель системы экспортируется на машину реального времени.

Каждая из этих технологий находит применение на разных этапах разработки контроллера.

**Model in the Loop (MiL)** используется на ранних стадиях проектирования для разработки и тестирования алгоритмов управления оборудованием.

**Software in the Loop (SiL)** является следующим шагом в процессе разработки. Создание кода контроллера завершено, но он не работает на собственной аппаратной платформе. Контроллер может работать на эмуляторе – *Siemens PLCsSim*, в среде разработки – *B&R Automation Studio*, на *SoftSPS* или *Windows DLL*.

Тестирование **Hardware in the Loop (HiL)** является наиболее трудоемким с точки зрения прилагаемых усилий и технологических требований, но также и наиболее точной формой виртуального тестирования. В *HiL*

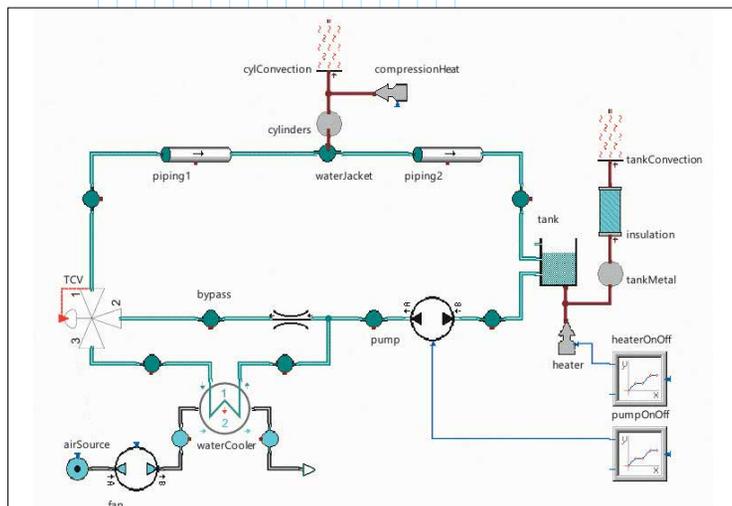


Рис. 4. Модель системы водяного охлаждения для поршневого компрессора, смоделированная в среде *SimulationX*

## Программный комплекс *SimulationX*

При изучении и оптимизации технологических процессов и производств широко применяются методы имитационного моделирования. Эта точная и относительно быстрая технология позволяет накопить все необходимые знания для будущего изделия еще до начала его производства.

Одним из программных комплексов, предназначенных для решения задач имитационного моделирования, является программа *SimulationX* от *ESI Group*.

***SimulationX*** – программный комплекс для моделирования физико-технических объектов и систем. Возможности этого программного обеспечения могут быть использованы для разработки, моделирования, симулирования, анализа и виртуального тестирования систем различной сложности. На единой платформе моделируется поведение и взаимодействие различных физических объектов механики, приводной техники, электрических, гидравлических, пневматических, термодинамических и других систем. В ходе расчета можно наблюдать и анализировать поведение системы, при этом параметры могут быть скорректированы. *SimulationX* поддерживает язык моделирования *Modelica*, который используется в частности для создания пользователем собственных моделей.

Имитационное моделирование играет важную роль при оптимизации сложных технологических процессов. С его помощью можно имитировать поведение тех объектов и процессов, реальные эксперименты с которыми нецелесообразны с экономической точки зрения или опасны.

Основные преимущества ***SimulationX***:

- Моделирование переходных процессов во времени;
- Объектно-ориентированное, точное построение моделей, использующее принцип сетевых связей, на основе дифференциальных уравнений;
- Быстрое и интуитивно-понятное моделирование;

используется как аппаратное, так и программное обеспечение реального контроллера. Имитационная модель системы больше не работает в среде моделирования, а экспортируется на платформу *HiL* и работает в режиме реального времени. Сигналы интерфейса генерируются платформой *HiL*.

Таким образом, программы управления оборудованием могут быть виртуально разработаны и испытаны.

При таком большом количестве различных взаимодействующих друг с другом подсистем (двигатель, системы охлаждения, управления и т.д.), которые зачастую проектируются разными командами, важно иметь общую структуру данных для всех команд, с которой можно будет работать. Системная инженерия, основанная на моделях (*MBSE*) направлена на продвижение интеграции технических областей, дисциплин и



- Максимальная свобода, обеспечиваемая языком объектно-ориентированного проектирования *Modelica*;
- Комплексные методы анализа;
- Предварительная обработка данных, расчет и выдача результатов в рамках единой платформы;
- Удобство имитации в реальном масштабе времени;
- Гибкий интерфейс.



рабочих процессов путем создания системной модели, сохраняющей взаимосвязи и связи между неисправностями, возникающими в жизненном цикле продукта. Тесная интеграция инструментов имитационного моделирования, а именно *SimulationX*, в инфраструктуру *MBSE* не только улучшает процесс проектирования на ранних этапах, но и позволяет интегрировать имитационные модели и результаты испытаний в данные жизненного цикла.

Таким образом создается платформа, в которой требования, предъявляемые к конструкции, проектированию имитационных моделей и результатам имитационного моделирования в виде виртуальных тестовых кейсов, связаны с требованиями для валидации. Благодаря эффективности этого подхода можно значительно уменьшить усилия по разработке системы. 🧐