

# СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ РКД И ИСПЫТАНИЯМ ОПОР ВЛ

ФИЛИАЛ АО «НТЦ ФСК ЕЭС» - СИБНИИЗ

Домрачев Д.В., старший инженер отдела математического моделирования и перспективных конструкторских решений

Усенко А.А., старший инженер отдела математического моделирования и перспективных конструкторских решений

На сегодняшний день конструкторская документация, разрабатываемая в виде двумерных чертежей, преобладает в общем объеме инженерных документов. Однако ввиду доступности технологий, инструментов проектирования и всеобщей тенденции на цифровизацию, доля документов, выполненных с применением электронных 3D моделей, постоянно увеличивается. Применение 3D моделей позволяет повысить качество разрабатываемой документации, что является весомым преимуществом.

В настоящее время, в России нормативная документация претерпевает значительные изменения, связанные с развитием и применением цифровых технологий. Постепенно вводятся новые и обновляются действующие стандарты, которые нормируют разработку и применение информационных моделей. При этом, действующие НТД на разработку конструкторской документации, не позволяют в полной мере раскрыть потенциал использования электронных моделей. Действующая НТД (ГОСТ Р 21.101-2020) рекомендует разрабатывать конструкторскую документацию в соответствии с действующими положениями стандартов СПДС и ЕСКД и использовать информационную модель в качестве справочного ресурса для принятия каких-либо проектных решений, что приводит к определенным сложностям:

- увеличение объема инженерной документации: при обработке, проверке и внесении изменений приходится работать с большим количеством документов;
- информация дублируется в чертежах и модели, следовательно, возможны расхождения информации (например, при внесении изменений).

Логичным в данной ситуации является решение о возможности применения цифровых моделей при проектировании в качестве основного источника информации.

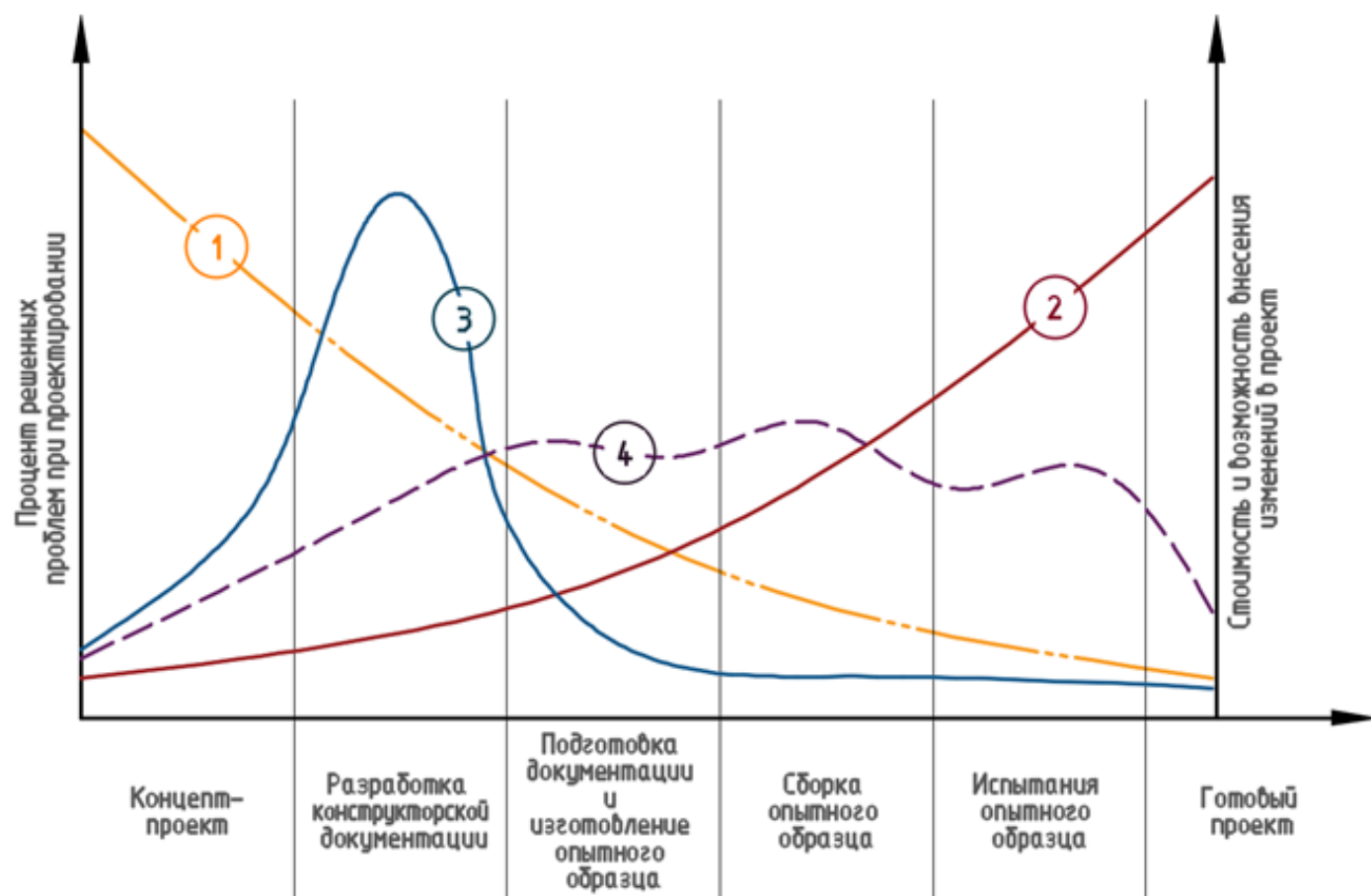
Несмотря на возникающие сложности с техническим и нормативным регулированием, объем работ, выполняемых с применением электронных моделей, неуклонно растет, также растет и число исполнителей (участников) проектов для которых электронная модель является важным документом для выполнения работ (конструкторские, строительные, монтажные и эксплуатирующие организации). Доступность технологий и наличие инструментов, позволяют организовать процессы разработки и применения конструкторской документации без использования чертежей. На некоторых стадиях жизненного цикла объекта цифровые информационные модели уже широко применяются, однако, в большинстве случаев, цифровые модели по-прежнему являются справочным ресурсом.

Для решения задач проектирования (с учетом информационного моделирования) и систематизации процессов предлагается применить комплексный подход к разработке конструкторской документации для новых электросетевых конструкций.

Предлагаемый подход к разработке новых конструкций опор, формат представления конструкторской документации и последующее ее применение ориентированы на развитие технологии информационного моделирования. Новый подход подразумевает разработку конструкций опор в виде цифровых моделей и их использование в качестве первоисточника документации.

Это позволяет сократить затраты времени на всех стадиях проектирования новых конструкций опор, при применении моделей на стадиях жизненного цикла объекта, повысить качество проектных решений, а в последствии позволяет получить положительный экономический эффект.

Чтобы наглядно оценить преимущества проектирования с применением технологий цифрового моделирования над традиционным видом, на рисунке 1 приведен адаптированный общеизвестный график зависимости затрат на корректировку проекта от стадии разработки с учетом специфики разработки новых типов опор.

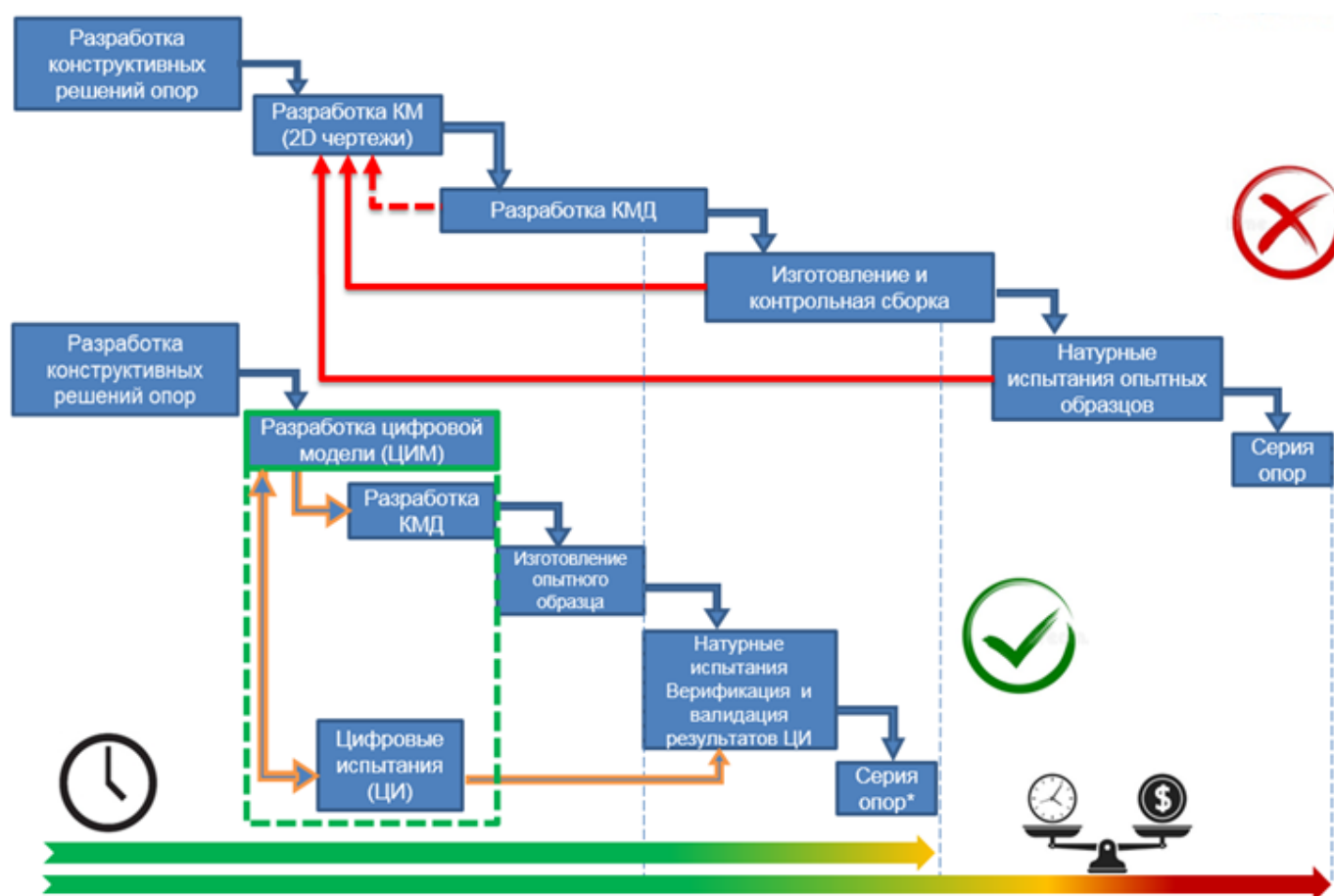


1 – возможность вносить изменения в проект; 2 – стоимость внесения изменений в проект; 3 – проектирование с применением технологии информационного моделирования; 4 – традиционный вид проектирования.  
Рисунок 1. График зависимости затрат на корректировку проекта от стадии разработки

Новый подход, в части разработки конструкторской документации, с использованием технологий цифрового моделирования, позволяет минимизировать ошибки на различных стадиях выполнения работ. Например, при изначальном проектировании конструкции в пространстве модели обеспечивается геометрическая целостность и собираемость конструкции, прорабатывается детально 100% узлов, исключаются всевозможные пересечения и наложения элементов друг на друга в сложных узлах и в смежных гранях. Данные возможности позволяют точно выполнить в авто-

матическом режиме подсчет ведомостей металла и крепежных изделий. Также, при незначительных трудозатратах на основе модели достаточно просто выполнить разработку чертежей КМД, а при необходимости и чертежей марки КМ.

В качестве примера, на рисунке 2 приведено сравнение существующего (традиционного) и предлагаемого подхода при разработке опор ВЛ (включая разработку конструкторской документации) с точки зрения затрачиваемого времени.



Существующий (традиционный) подход разработки приведен сверху, новый подход – снизу.  
\* - серия опор выполнена в виде комплекта цифровых информационных моделей.  
Рисунок 2. Сравнение подходов при разработке опор ВЛ включая конструкторскую документацию

Предлагаемый подход предполагает разработку цифровой модели опоры и последующую ее передачу конструкторским отделам заводов, для выполнения чертежей марки КМД непосредственно с модели. Разработка КМД с модели позволяет исключить ошибки, возникающие при традиционном проектировании и обеспечивает 100% собираемость опоры. Таким образом значительно сокращаются затраты времени на стадиях подготовки документации, изготовления опор, а также при контрольной сборке. В перспективе представляется возможным передача информации из цифровых моделей непосредственно на технологическое оборудование.

Данный подход проектирования позволяет реализовать разработку и испытания новых конструкций опор с применением цифровых моделей. На сегодняшний день, при соответствующем программном оснащении возможно выполнение

разработки конструкций в одной программной среде (CAD – системы) и передача геометрии в другую программную среду (CAE – системы) для выполнения расчетов и/или испытаний. Возможность взаимодействия программных продуктов позволяет значительно ускорить выполнение промежуточных расчетов для проверки определенных узлов конструкции и цифровых испытаний конструкции.

Взаимодействие между программными продуктами выполняется посредством общих форматов файлов, при сохранении модели. Механизм передачи данных реализован в значительном количестве программных комплексов. Стоит отметить, что в зависимости от формата сохранения данных зависит и объем передаваемых сопутствующих материалов (свойства конструкции, атрибутивная информация и прочее). Для обмена моделями между программными комплексами рекомендует-

ся использовать формат данных с открытой спецификацией - Industry Foundation Classes (IFC).

Реализация подхода проектирования с применением цифрового моделирования опробована на существующей опоре. На рисунке 3 приведены этапы разработки документации на примере нижней секции опоры:

- на первом этапе, как и при классическом проектировании, производится расчет стержневой конструкции на расчетные режимы работы опоры. По результатам расчета предварительно назначаются сечения элементов и требуемое количество болтов;

- на втором этапе выполняется моделирование опоры «в теле» с проработкой и детализацией, достаточной для передачи модели в расчетный комплекс и выполнения цифровых расчетов. На данном этапе разрабатываются основные конструкторские решения, конструируются узлы, уточняются сортамент и параметры соединений;

- на третьем этапе производятся цифровые испытания опоры и выполняется доработка модели по результатам испытаний, также выполняется доработка модели опоры до уровня детализации, соответствующей готовой опоре;

- на четвертом этапе выполняется формирование чертежей марки КМД, либо передача электронной модели заводам-изготовителям.

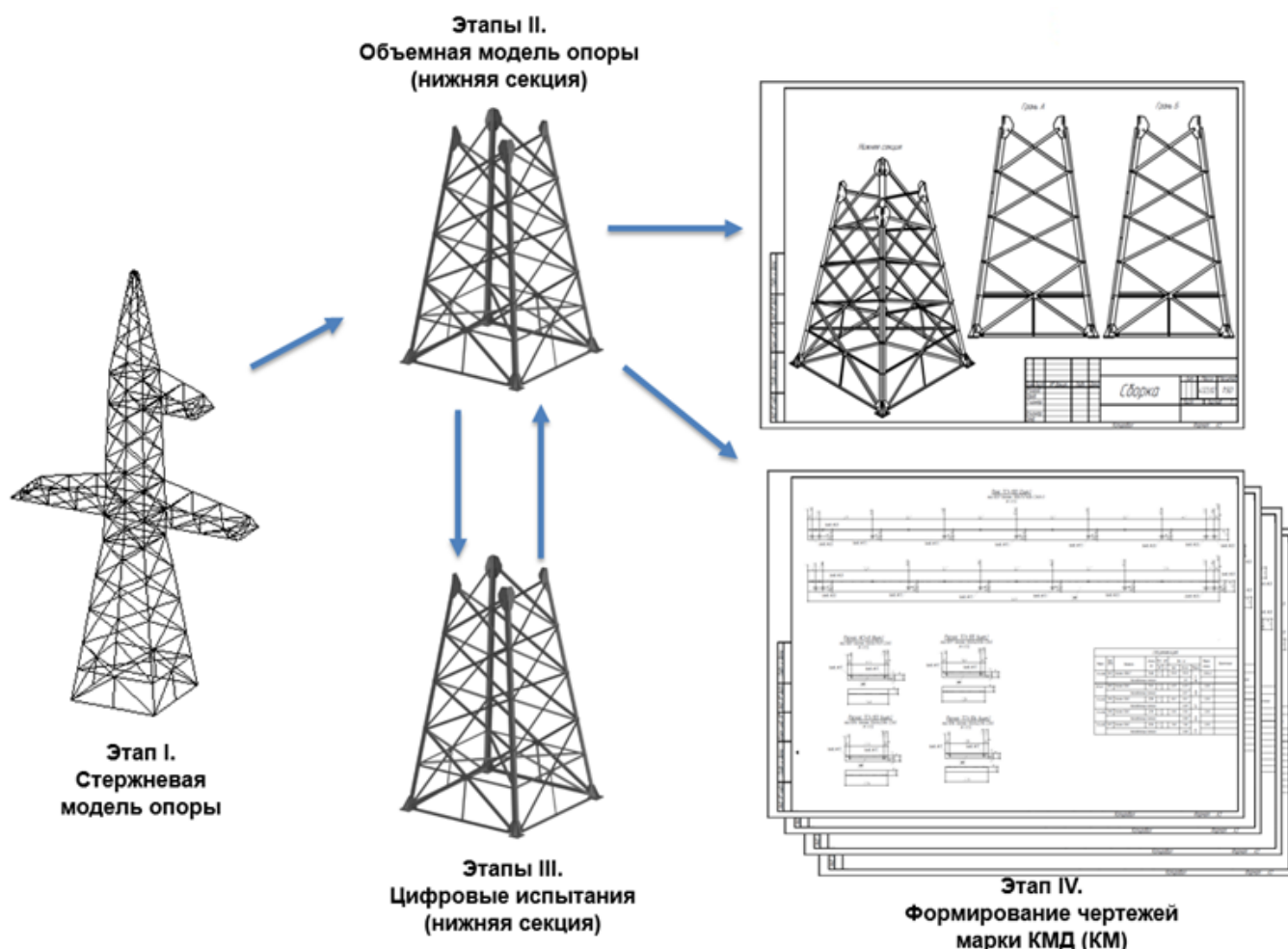


Рисунок 3. Этапы разработки цифровой модели

В перспективе, цифровые модели опор, обладающие свойствами, атрибутами и прочей информацией, должны применяться в качестве объектов в цифровой информационной модели проекта ВЛ. Использование цифровой информационной

модели опоры, позволит систематизировать производственные процессы, участники проекта получают доступ исключительно к той информации, которая им требуется для выполнения задач – см. рисунок 4.



Рисунок 4. Распределение информации передаваемой участникам проекта

Применение цифровых информационных моделей на всех стадиях жизненного цикла объектов позволяет минимизировать ошибки при выполнении работ и ускорить производственные процессы.

Кроме вышесказанного, применение цифровых моделей положительно отразится на разработке новых конструкций опор, в том числе в части проведения испытаний.

Согласно требованиям ПАО «ФСК ЕЭС», при разработке новых типов опор требуется проводить контрольные механические испытания натурных образцов конструкций на статические нагрузки на специализированных испытательных полигонах, а также, при применении новых материалов и конструкций элементов ВЛ и других новых технических решений должны проводиться их испытания и приемка в установленном порядке.

Существующая в настоящий момент методика испытаний имеет ряд недостатков, в результате которых при проведении натуральных механических испытаний выявляются только грубые ошибки, допущенные при проектировании или изготовлении опор ВЛ и не предоставляется полная информация о напряженно-деформированном состоянии опытного образца в результате воздействия предельных нагрузок. Блок-схема, отражающая алгоритм разработки новых типов конструкций опор с учетом существующей методики испытаний представлена на рисунке 5.

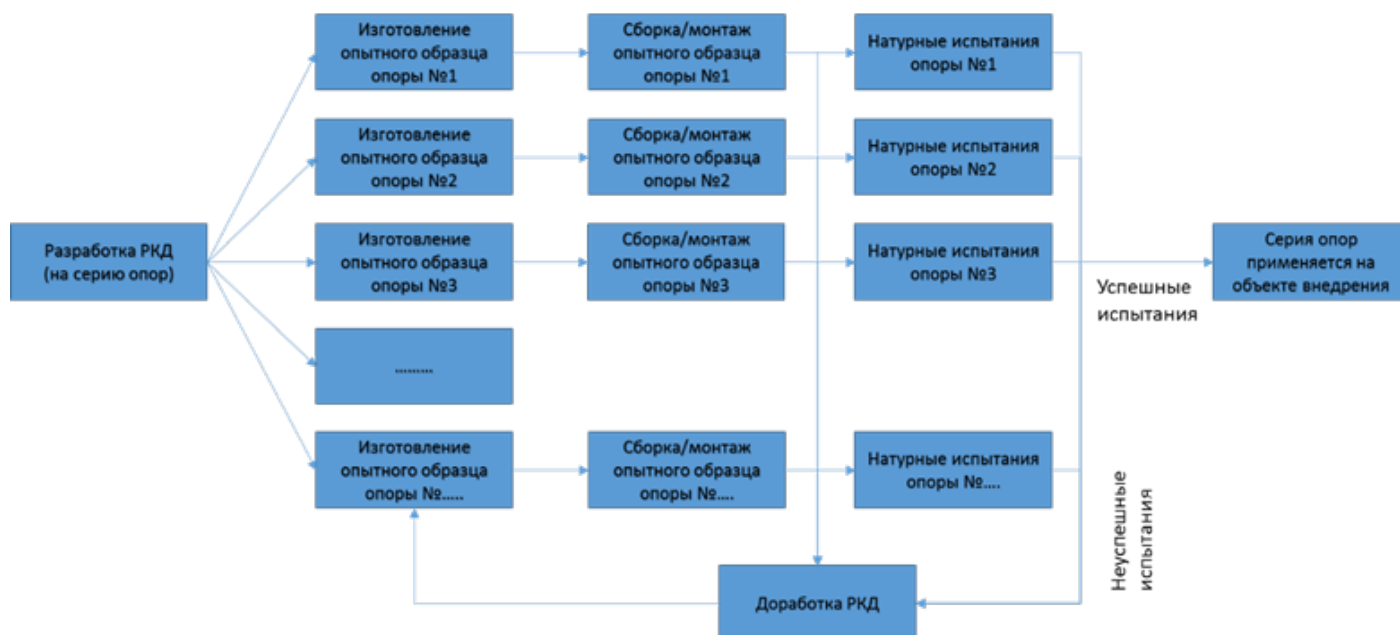


Рисунок 5. Алгоритм разработки новых типов конструкций опор ВЛ.

Использование цифровых информационных моделей опор ВЛ позволяет пересмотреть подход не только к разработке конструкций опор, но и к проведению их испытаний.

Современный уровень развития вычислительных технологий дает возможность анализировать напряженно-деформированное состояние опоры и ее элементов с помощью проведения численных

испытаний цифровой модели, что, в свою очередь, позволяет усовершенствовать порядок проведения испытаний опор ВЛ.

**Данный подход к испытаниям опор является комплексным и включает в себя:**

- цифровые испытания контрольного образца для проверки принятых конструктивных решений;



**Рисунок 6. Алгоритм разработки новых типов конструкций опор ВЛ при комплексном подходе**

Процесс проведения таких испытаний представляется следующим образом.

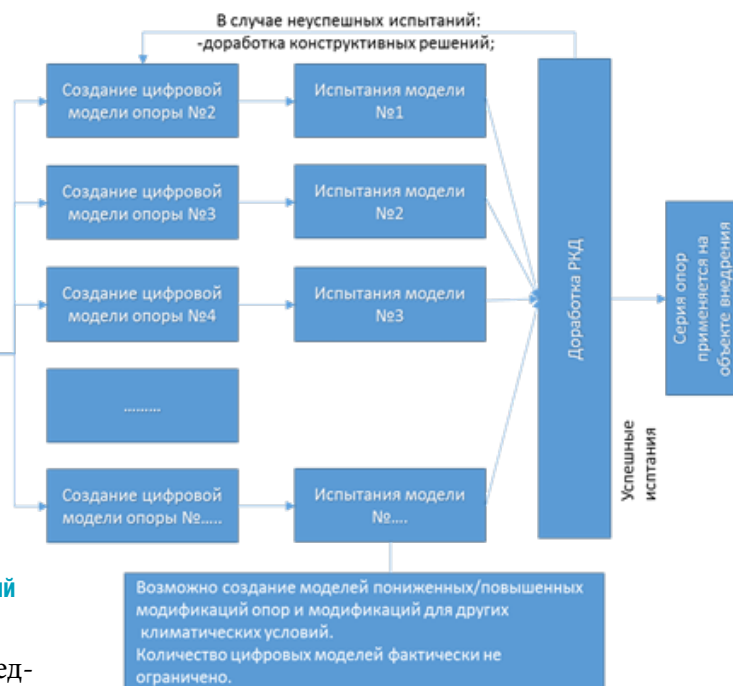
Предварительная цифровая модель, разработанная на предыдущих этапах создания конструкторской документации (см. рисунок 3, этапы I-II) импортируется в расчетный комплекс. После импорта, выполняется адаптация модели в расчетном комплексе и производятся цифровые испытания новой опоры с целью проверки несущей способности опоры и ее элементов, оценки запаса несущей способности с точки зрения общей и местной потери устойчивости, моделирование динамических воздействий. На основании результатов расчета возможна оперативная доработка конструктивных решений, не требующая повторного изготовления элементов опоры ВЛ.

После успешного прохождения цифровых испытаний, по доработанной модели опоры изготавливается опытный образец и проводятся его натурные испытания.

- натурные испытания контрольного образца, выбранного с целью верификации серии цифровых испытаний и проверки расчетных предпосылок при создании расчетных моделей;

- цифровые испытания модификаций подобных опор на основании верифицированной расчетной модели.

Блок-схема разработки новых типов конструкций опор ВЛ при комплексном подходе представлена на рисунке 6.



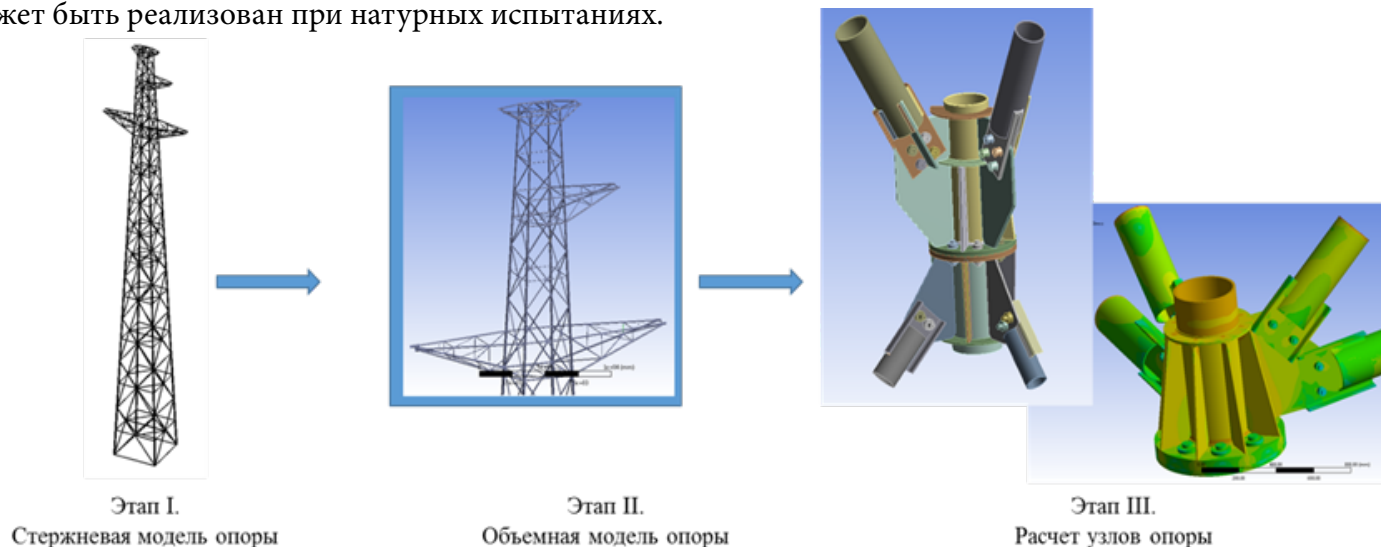
Далее, результаты натурных и цифровых испытаний проходят верификацию и валидацию в установленном порядке.

При реализации данного подхода на практике возникают трудности, вызываемые большим объемом конечно-элементной модели, расчет которой требует использования значительных расчетных мощностей, зачастую недоступных инженерам проектных организаций. Для решения подобных проблем следует рассмотреть возможность использования различных упрощающих гипотез, таких как: использование эквивалентных сечений элементов или принцип смягчения граничных условий, позволяющих производить расчет опытного образца на грубой сетке конечных элементов, а затем уточнять результаты расчета на отдельных узлах опоры ВЛ.

Данный подход к проведению испытаний в еще

большей степени востребован в случаях, когда проведение натурных испытаний ограничено возможностями испытательных полигонов, а динамический характер приложения нагрузок не может быть реализован при натурных испытаниях.

Схема проведения цифровых испытаний опор в указанном случае представлена на схеме на *рисунке 7*.

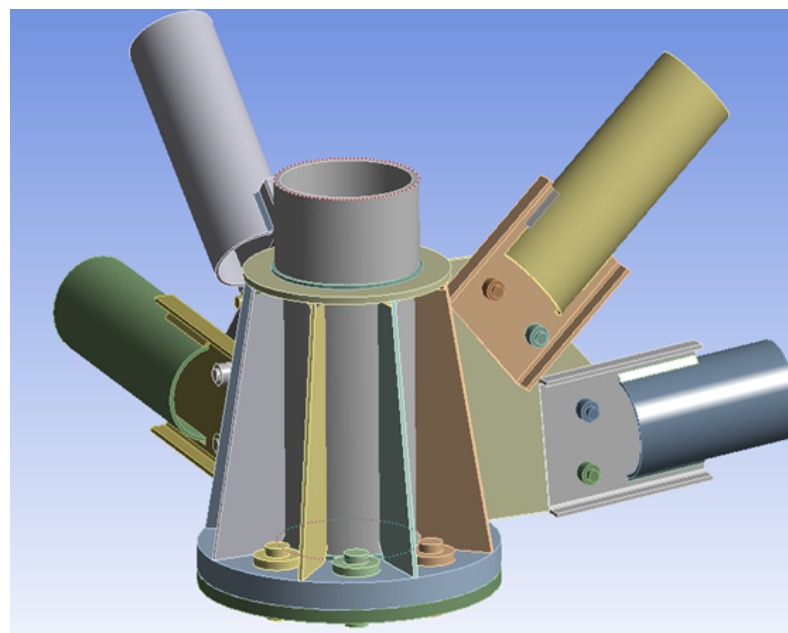


**Рисунок 7. Схема проведения цифровых испытаний опор**

Расчет может быть проведен в три этапа. На первом этапе выполняются расчеты стержневой модели опытного образца во всех расчетных режимах опоры. По результатам расчета данного этапа осуществляется подбор сортамента опор.

На втором этапе испытаний создается объемная конечно-элементная модель опоры, производятся ее расчеты во всех расчетных режимах. Все элементы опоры моделируются как объемные тела, узлы в точках пересечения моделируются как узловые вставки с приведенной жёсткостью, соответствующей реальной жесткости узла.

Далее, на третьем, заключительном этапе создаются вспомогательные расчетные схемы с детальной геометрией основных узлов. Пример узла представлен на *рисунке 8*.



**Рисунок 8. Фрагменты объемной модели. Опорный узел**

Руководствуясь принципом смягчения граничных условий, согласно которому в сечениях, достаточно удалённых от мест приложения нагрузки, деформация тела не зависит от конкретного способа нагрузки и определяется лишь статическим эквивалентом нагрузки, по границам узлов на вспомогательных расчетных схемах прикладываются перемещения и реакции, импортированные из соответствующих сечений основной расчетной схемы.

Полученные в результате расчетов напряжения и перемещения сравниваются с допускаемыми значениями в соответствии с требованиями СП 16.13330.2017. Распределение эквивалентных напряжений в элементах опоры по результатам численных испытаний представлены на *рисунке 9*.

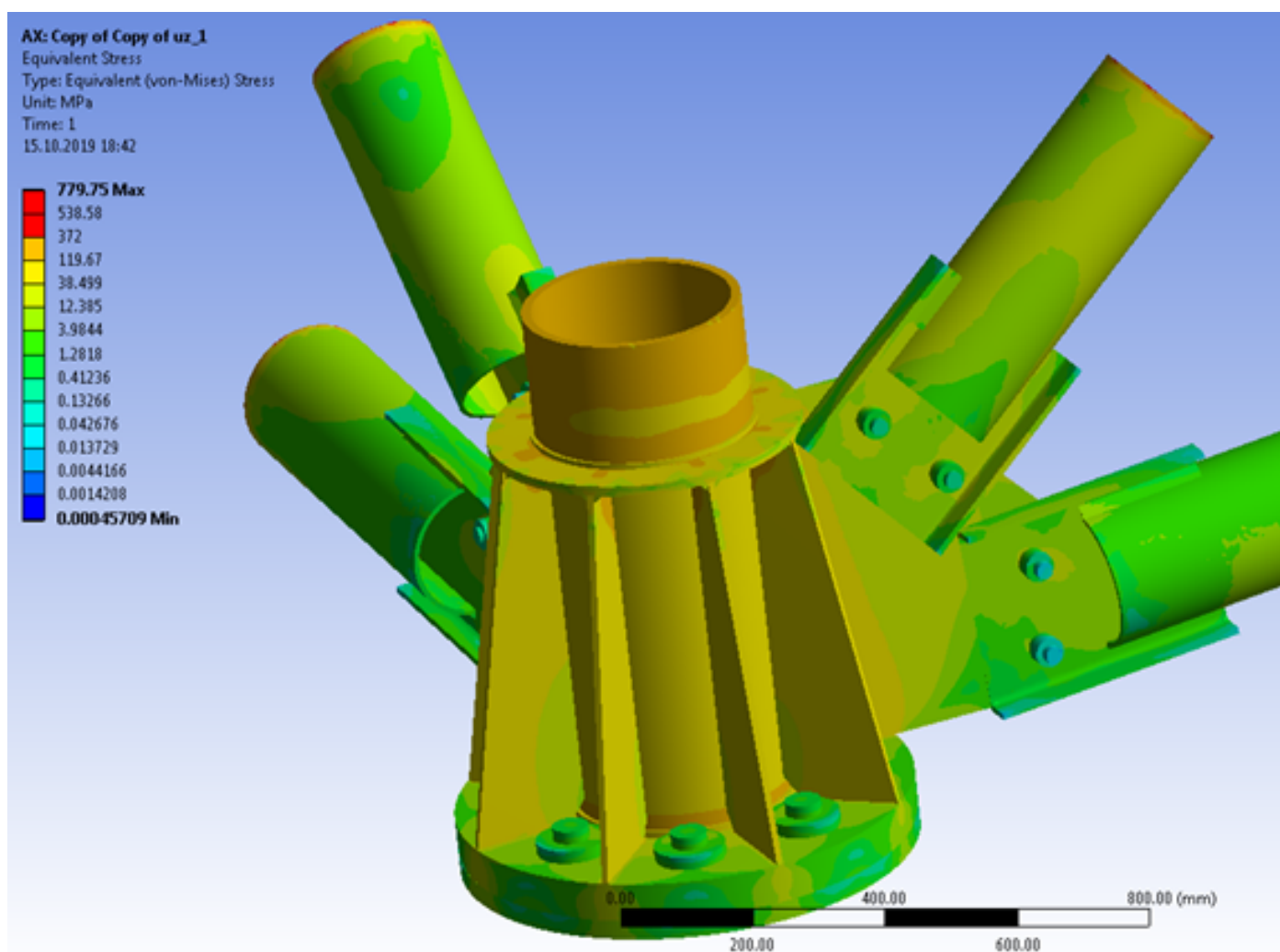


Рисунок 9. Распределение эквивалентных напряжений в узлах конструкции

Введение упрощающих гипотез в расчетную модель при цифровых испытаниях требуют обязательной верификации и валидации результатов с реальным поведением конструкции, поэтому полный отказ от натурных испытаний на данный момент невозможен.

В настоящий момент ведется работа по автоматизации технологии проведения комплексных испытаний. В алгоритмах автоматизации должны быть заложены инструменты, позволяющие реализовать упрощающие гипотезы, требуемые для создания расчетной схемы при минимальном участии пользователя и, в перспективе, позволить сократить этапность проведения цифровых испытаний.

Конечным результатом данной работы должен стать упрощенный алгоритм, позволяющий адаптировать цифровую информационную мо-

дель, полученную при разработке РКД, для проведения цифровых испытаний опоры ВЛ.

Такой подход позволяет значительно сократить потребность в натурных испытаниях опор ВЛ, сохранив в обязательном порядке испытания только контрольных образцов, необходимых для верификации результатов цифровых испытаний.

При применении комплексных испытаний предоставляется возможность детального анализа напряженно-деформированного состояния конструкции опоры и оперативной доработки проектных решений на любой стадии проведения испытаний.

Практическая реализация методики комплексных испытаний позволит получить быстрый и эффективный инструмент для внедрения новых типов опор, совмещающий в себе преимущества



натурных и цифровых испытаний, обеспечивающий соответствие работы цифровой информационной модели и реальной конструкции опоры ВЛ.

Использование цифровых информационных моделей гарантирует исключение неточностей на стадии изготовления и сборки конструкции новых типов опор и позволяет испытывать любые опоры ВЛ.

Предлагаемый подход разработки РКД с использованием цифровых информационных моделей в совокупности с комплексными испытаниями позволяет сократить затраты при разработке новых типов опор, повысить качество проектных решений и получить положительный экономический эффект. ■

Филиал АО «НТЦ ФСК ЕЭС» - СибНИИЭ  
Новосибирск  
+7 (383) 244-06-02  
office@ntcsib.ru

Контакты авторов:  
Домрачев Д.В.  
+7 (383) 244-06-02 доб.221  
domrachev.dv@ntcsib.ru  
Усенко А.А.  
+7 (383) 244-06-02 доб.109  
usenko@ntcsib.ru