

## Использование САПР для решения исследовательских задач при проектировании опор воздушных линий электропередачи

*Аспирант ГОУ СПбГПУ Д.Н. Смазнов\**

**Современная электроэнергетика** России прошла путь ряда реформ и сформировалась в период образования новых государств Содружества. Но реалии времени требуют постоянного развития и на данном этапе происходят очередные глобальные перемены и решаются вновь накопившиеся проблемы.

Одной из основных проблем в энергетике остается необходимость обновления её основных фондов. По официальным данным ОАО «Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы» (ФСК ЕЭС) ясно, что нарастание объемов электросетевого оборудования, отработавшего свой ресурс, намного превышает темпы вывода его из работы и обновления. Замену основного электросетевого оборудования по ресурсным условиям необходимо производить после 25 – 30 лет эксплуатации. Реальное состояние электрических сетей следующее.

- Многие регионы нашей страны сталкиваются с проблемой ограниченной пропускной способности ЛЭП. По данным ФСК ЕЭС, список регионов «пиковых нагрузок» включает 16 областей, в числе которых Московская, Ленинградская, Нижегородская, Архангельская, Волгоградская области, Краснодарский и Пермский край, республика Коми, Дагестан и другие. Уже сегодня энергопотребление этих районов в несколько раз превышает величины, заложенные в Энергетической стратегии РФ до 2020 года, и потребление электроэнергии в них постоянно растет
- Средний срок эксплуатации ВЛ (воздушных линий) 750-1150 кВ составляет 20 лет, ВЛ 330-500 кВ — 24 года, при этом более 30 % ВЛ напряжением 500 кВ эксплуатируются свыше 30 лет
- Износ опор ЛЭП составляет 36%. Соответственно, необходима их замена. Всего в пониженном варианте за период 2004-2013 гг. намечается ввод 30024 км ВЛ 330 кВ. Реализация этого варианта развития электроэнергетики потребует капиталовложений в электросетевое строительство в размере 324 260 млн. руб. Частным примером может выступить подготовка инфраструктуры города Сочи к олимпиаде 2014г.

Реформы в отрасли в первую очередь направлены на создание эффективного электроэнергетического рынка с масштабным привлечением инвестиций. В целом в краткосрочной перспективе среди основных направлений инвестирования для Единой энергосистемы России Энергетической стратегией предусматривается:

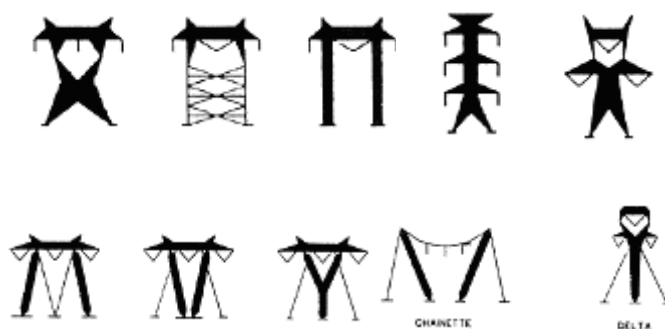
- Строительство и техническое перевооружение электростанций
- Совершенствование и развитие электрических сетей для межгосударственного транспорта электроэнергии в СНГ и ее экспорта в сопредельные страны
- Поддержка проектов энергосбережения как одного из стратегических направлений повышения эффективности электроэнергетики
- Интеграция рынка России с электроэнергетическими рынками Европейского Союза и других стран Евразийского континента
- Создание сильной электрической связи между восточной и европейской частями России путем сооружения линий электропередачи напряжением 500 и 1150 кВ, а за 2010 г. - передач постоянного тока, проходящих по территории России. Роль этих связей особенно велика в условиях необходимости переориентации европейских районов на использование угля, т.к. позволяет заметно сократить завоз восточных углей для ТЭС
- Усиление межсистемных связей транзита между ОЭС (Объединенной энергетической системой) Средней Волги – ОЭС Центра – ОЭС Северного Кавказа, позволяющего повысить надежность энергоснабжения региона Северного Кавказа, а также ОЭС Урала – ОЭС Средней Волги – ОЭС Центра и ОЭС Урала – ОЭС Северо-Запада для выдачи избыточной мощности ГРЭС Тюмени
- Усиление системообразующих связей между ОЭС Северо-Запада и Центра
- Развитие электрической связи между ОЭС Сибири и ОЭС Востока, позволяющей обеспечить параллельную работу всех энергообъединений страны и гарантировать надежное энергоснабжение дефицитных районов Дальнего Востока

Безусловно, принятые направления развития должны привлечь инвестиции и реформировать одну из основополагающих отраслей экономики. Особое внимание теперь уделяется рациональному использованию средств и применению современных технологий. Энерго- и ресурсосбережение является главным

Смазнов Д.Н. Использование САПР для решения исследовательских задач при проектировании опор воздушных линий электропередачи

направлением технической политики. Происходящие изменения нашли отражение в разработанных и утвержденных «Положении о технической политике ОАО "ФСК ЕЭС"» и «Положении о технической политике в распределительном сетевом комплексе».

С началом реформ общий объем инвестиций в сетевое строительство ФСК ЕЭС возрастает с каждым годом. Но традиционные подходы не совсем отвечают ожиданиям инвестора. Проводимая в прошлые годы политика унификации привела к строительству сооружений со значительным перерасходом материалов. Добиться же снижения расхода ресурсов можно только при комплексном подходе к решению задачи за счет совершенствования архитектурно-планировочных и конструктивных решений с учетом реальных региональных климатических, технико-экономических, социальных и экологических особенностей.



**Рисунок 1. Опоры, устанавливаемые в сложных горных и городских условиях, опоры с индивидуальными конструктивными решениями**

Рассмотрим одну из составляющих строительной части отрасли – металлические решетчатые опоры, которые являются основой для воздушных линий. Проектирование опор воздушных линий электропередачи – задача трудоемкая и начинается с анализа результатов электротехнических и геодезических данных. Одним из важных этапов энерго- и ресурсосбережений является применение уже на начальной стадии проектирования современных средств САПР, которые позволяют проводить быстрый анализ проектных решений и автоматизируют расчеты.

Смазнов Д.Н. Использование САПР для решения исследовательских задач при проектировании опор воздушных линий электропередачи

Следует уточнить, что с введением в 2003 году 7-го издания Правил устройства электроустановок (ПУЭ) резко возросли требования к надежности сетей. Отмечено, что введение «плавающих» коэффициентов по надежности затрудняет применение опор действующей унификации и разработку их новых типовых конструкций. Новые требования и стандарты делают труднореализуемым, а иногда и невозможным применение стандартных, унифицированных подходов при проектировании новых ВЛ и реконструкции существующих.

Проектные организации, не располагающие современными компьютерными средствами и использующие при проектировании унифицированные типы опор, зачастую вынуждены идти на применение конструкций с избыточными характеристиками для удовлетворения всего спектра требований к проектируемой линии. Это приводит к значительному увеличению капитальных затрат. Оптимизация применяемых конструкций в зависимости от конкретных условий проектирования до сих пор является редкостью в среде проектных организаций.

Как уже не раз доказывалось, реализовать задачи современного этапа на старой технической и технологической базе объективно трудно. Не случайно во многих статьях первым в ряду преимуществ принято обозначать адаптивность (гибкость) проектирования. Ключевым различием в проектировании конкретных линий электропередачи в России и на Западе является принцип выбора опор для проектируемой линии и расчета пролетных расстояний. Унифицированные методики проектирования подразумевают выбор опор для заданного типа напряжения и расчет получившихся пролетных расстояний для заданных ветровых и гололедных условий. Дискретность шкалы допустимых нагрузок унифицированных опор делает выбор неоптимальным при любых условиях: как правило, критической является одна из характеристик, остальные же остаются избыточными. Практика применения опор при проектировании ВЛ показывает возможность более детального подбора характеристик. Казалось бы, изменение конструкции стальной решетчатой опоры, как правило, ведет за собой фактически разработку совершенно нового альбома, проведения серьезного математического моделирования, просчета нескольких десятков узлов соединения. То есть проектирование подобной конструкции, хотя и не является технологически сложным, но по своему объему сопоставимо с проектированием промышленного здания. Но с помощью специального САПР проектная группа может быстро проводить модификацию существующей конструкции, адаптируя ее для конкретных условий. В данной работе рассматривается использование программы «Транслайн», разработанной ООО «СевЗап НПЦ Архимет»,

**Хотелось бы поподробнее** остановиться на перспективах, которые открываются перед инженерами при использовании современных технологий. Эти технологии помогут перенять прогрессивный мировой опыт, применить гибкие методики проектирования и решить ряд имеющихся проблем, а именно:

- Помогут выполнять детальный анализ технологических нагрузок на опоры (особых специфических нагрузок), на которые, как показал опыт, унифицированные опоры не рассчитаны. К примеру, нагрузок от звуковых и взрывных волн.
- Помогут рассмотреть возможность проектирования линии электропередачи сверхвысокого напряжения (345, 550, 765 кВ), и ультравысокого напряжения с применением высоких стальных опор башенного типа высотой 60 ÷ 80 м из стальных труб. Особенно это актуально на магистральных ВЛ для улучшения экологической обстановки вблизи ВЛ и сокращения ширины полосы, занимаемой трассой ВЛ.
- Помогут применять в проектах марки сталей повышенной прочности и коррозионной стойкости для изготовления опор и использовать европейский сортамент и стали.
- Помогут оценить экономическую эффективность при исключении из технологического процесса подъема свободностоящих опор - шарниров и стрел. Применение такого метода поворота при установке опор в проектное положение приводит в конечном итоге к их утяжелению. Необходимо скорректировать существующие конструкции металлических опор под конкретную технологию монтажа.
- Помогут проектировать конструкции опор оптимальных геометрических размеров, разрабатываемых для конкретных ВЛ, иногда довольно индивидуальных (см. рис. 1). Специфичность условий строительства ВЛ в мире такова, что создание опоры ВЛ, удовлетворяющей одновременно заказчиков из Европы, Африки и Южной Америки, скорее всего, задача нереальная. К тому же решение по применению типовых проектов, срок действия которых закончился, находится в компетенции проектировщика и заказчика, которые несут ответственность за качество проектной документации для конкретного строительства.
- Помогут отказаться от применения 7—10 типоразмеров углового проката на одной опоре, что ведет к увеличению ее весовых показателей.

- Позволят проектировать по нормам Северной Америки, Европы, Азии, Востока и пр. Это, при отсутствии опыта применения различных норм проектирования, принятых в других странах (ANSI, ASTM, DIN), станет дополнительным инструментом, позволяющим с разных сторон оценить принятое проектное решение.
- Помогут гармонизировать российскую систему технического регулирования с международной. Объекты в РФ имеют низкую инвестиционную привлекательность для внешних инвесторов. Использование специального ПО, отвечающего европейским нормам повысит эту привлекательность.
- Ускорят оперативность проектирования, что будет одним из стимулов для снижения затрат и внедрения на предприятиях новой техники и технологий.
- Ускорят разработку новой нормативно-технической документации по организации и технологии строительного производства и упростят объединение отдельных структур и их работу и уменьшит формализм в вопросах согласования и утверждения проектов.

**Чтобы внедрить** новые методики решения указанных выше проблем в массовое применение, необходимо предварительно выполнить ряд научных обоснований, уделив внимание возможности исследования и проведения анализа вариантов оптимизации конструкции с использованием САПР и рассмотрев особенности применения конкретного программного продукта при проектировании. Обозначим, что объектом исследования будут являться опоры линий электропередач, а предметом - конструктивные решения, обеспечивающие повышение прочностных характеристик с учетом региональных условий строительства и увеличение экономической эффективности. После этого можно сказать, что научная новизна обоснований состоит в решении вопросов повышения несущей способности опор, разработке и испытании методик уточняющих расчетов конструкций и предложении новых зависимостей. При разработке новых методик специальные САПР значительно облегчают решение весьма сложных задач и обеспечивают как проведение статического расчета металлоконструкции, так и решение некоторых нелинейных и динамических задач. В частности, может быть проведен деформационный расчет, учитывающий дополнительные силовые факторы, возникающие при учете осевых компонентов нагрузок в случае конечных перемещений элементов конструкции. Также может проводиться и нелинейный расчет, при котором учитываются изменения формы элементов конструкции, возникающие при их деформациях. Поставленные задачи решаются методом численных теоретических исследований, основанным на современных достижениях в области теории и практики создания САПР, физико-математического моделирования с использованием системного анализа.

**Как один из вариантов**, обозначим следующую последовательность исследований для разработки необходимых обоснований:

1. Корректировка существующей стальной решетчатой конструкции опоры, которая обеспечивает конструктивную прочность и является более экономически эффективной.
2. Обоснование конструктивных решений, позволяющих увеличить несущую способность.
3. Проведение анализа напряженно-деформированного состояния конструкции в целом и отдельных ее элементов.
4. Решение задачи сопоставления взаимных деформаций узлов конструкции при экспертизе принятых проектных решений.
5. Анализ эффективности и возможных негативных последствий в случае ремонта конструкции;
6. Анализ работы конструкции с учетом собственных форм колебаний, отказ от применения методик определения пульсационной составляющей ветровой нагрузки по ПУЭ-7. Применение уточняющих методик, изложенных в СНиП 2.01.07-85\*. Введение дополнительной уточненной методики определения собственных колебаний и пульсационной составляющей ветровой нагрузки. Расчет конструкции на значительно большее количество направлений воздействия ветровой нагрузки в зависимости от конкретных условий.
7. Проведение сравнения оптимизированной и взятой за прототип опоры.
8. Предложение методики оптимизационного расчета конструктивных решений, отличающейся учетом местных климатических условий и учетом особенностей работы конструкции, позволяющей находить экономически оптимальные параметры.
9. Оценка экономической эффективности применения новой конструкции.

**Решение** инженерных задач в части конечно-элементного анализа будем искать с использованием программы «Транслайн». При решении поставленных частных задач особый интерес в расчетах представляют небольшие локальные задачи с детальным исследованием отдельных элементов конструкций. К ним, Смазнов Д.Н. Использование САПР для решения исследовательских задач при проектировании опор воздушных линий электропередачи

например, относится исследование собственных частот колебания элементов и напряженно-деформированного состояния болтовых соединений или ответственных сварных узлов и деталей. Для решения таких задач классическими методами зачастую не хватает следующих первичных данных:

- числового значения нагрузок, возникающих в отдельных элементах узла;
- закона распределения нагрузки по узлам и деталям;
- уровня напряжений в какой-либо зоне, характера деформаций и др.

С целью получения необходимых данных создается модель всей конструкции, результатом расчета которой становятся все недостающие параметры нагрузки интересующих узлов. После этого переходят к рассмотрению отдельных узлов и деталей, и производится их расчет, то есть узел или деталь рассматривается как отдельная конструкция. Таким образом, осуществляется переход от общей конструкции к ее отдельным элементам и узлам, и соответственно, в первую очередь, решается общая задача для получения исходных данных и решения локальной задачи. Такой подход используется в расчетных задачах на прочность нечасто. И в этом заключается новизна исследований.

Для создания расчетной модели используется связанный с другими системами модуль, который может создавать трехмерные модели моделирования (например, в AutoCAD) и подготавливает их для проведения прочностного расчета;

Созданная модель может быть разбита на конечные элементы (то есть сгенерирована конечно-элементная сетка) и экспортирована в модуль прочностного расчета.

Программное обеспечение позволяет для существующих и проектируемых сооружений провести автоматизированные сбор нагрузок, расчет усилий и перемещений от статических и динамических нагрузок, расчет на устойчивость, на свободные колебания, проверку на резонанс. Это позволяет исследовать работу элементов сооружений с установлением действительного напряженно-деформированного состояния, конструктивный и оптимизационный расчеты.

В систему входит несколько исполняемых модулей, реализующих отдельные этапы проектирования:

- определение геометрических параметров расчетной схемы и ее элементов;
- определение физико-механических характеристик участков расчетной системы;
- сбор статических узловых нагрузок;
- расчет на устойчивость, расчет свободных колебаний, динамических нагрузок, усилий в элементах системы и перемещений от статических, динамических и результирующих нагрузок;
- определение напряжений в сечениях элементов и оценка их несущей способности;
- конструктивный расчет;
- оптимизация по массе металлоконструкции.

При решении прямой задачи (конструктивном расчете) процесс проектирования носит итерационный характер и отражает последовательность решения обратной задачи при заданных характеристиках сечений элементов и векторе внешней нагрузки. В ходе итераций сечения элементов уточняются, исходя из условия прочности.

С достаточной степенью точности получаемых результатов заданная система сооружения представляется в виде консольного либо шарнирно заделанного у основания стержня (в случае мачт) переменной жесткости с действующей на него продольной (гравитационной) и поперечной (ветровой) нагрузками.

Рассмотрим каждый из модулей системы подробнее.

*В расчете на устойчивость и колебания* использован энергетический метод. Расчетная схема описывается в дискретной форме с учетом изменения масс по высоте, с жесткостями, кусочно-постоянными по участкам расчетной системы. Система учитывает фактическую массу установленного оборудования, что сказывается на работе сооружения в худшую сторону. Хотя, в то же время, нормативными документами допускается эту массу не учитывать. В качестве математического аппарата использована матричная алгебра. Составление и формирование основных и вспомогательных матриц полностью автоматизировано. В определении динамических добавок к усилиям и перемещениям используется полный спектр "n" старших частот и соответствующие им координаты форм свободных колебаний. В определении единичных и других перемещений учитываются деформации сдвига, что повышает точность расчета. Выходными данными

расчета являются внутренние усилия и перемещения от статических и динамических воздействий в стержне ствола конструкции по участкам расчетной схемы.

*Расчет геометрических параметров.* Здесь вычисляются длины элементов конструкции (поясов, раскосов, распорок, диафрагм) и соответствующие им требуемые из условия предельной гибкости радиусы инерции. Моделируется расчетная схема (ее структура).

*Сбор статических узловых нагрузок и расчет масс.* Продольные нагрузки и массы определяются по известным технологическим нагрузкам и сечениям элементов конструкции. Модель расчета ветровой нагрузки полностью отражает требования СНиП "Нагрузки и воздействия". Для этого используется соответствующая нормативная база данных. Путем индексации каждого элемента конструкции единым алгоритмом реализуется нахождение аэродинамических показателей каждого из них, по которым затем определяются коэффициенты лобового сопротивления участка расчетной схемы и, наконец, узловая ветровая нагрузка.

*Оценка несущей способности* элементов конструкции проводится на основании результатов статического и динамического расчета. Усилия определяются способом вырезания узлов.

*Конструктивный расчет.* Исполняется только при решении прямой задачи строительной механики. Здесь происходит подбор сечений из условий предельной гибкости и прочности с помощью автоматического обращения к электронной базе данных сортамента металлических профилей.

*Оптимизация по массе конструкции.* Степень развития системы предполагает возможность проведения оптимизационного расчета, где критерием качества является масса элементов конструкций. Основными варьируемыми параметрами являются ширина и высота грани панели башни. Результатом расчета являются такие габариты панели башни, при которых усилия, возникающие в элементах конструкции, а, следовательно, и требуемая площадь поперечного сечения и масса минимальны.

Для сравнения: основным (сертифицированным) программным комплексом, реализующим идею МКЭ в расчетах строительных конструкций, на данный момент в Российской Федерации является SCAD. Практические расчеты показали, что результаты анализа в «Транслайн» и SCAD имеют расхождение в пределах 6%, что вполне допустимо для инженерных расчетов. Принципиальные позиции и отличительные особенности использования САПР «Транслайн» следующие:

- Мобильность и оперативная корректировка. Возможность творческого конструирования большого спектра новых форм. Экспресс-контроль параметров.
- Автоматическая генерация ветровой и гололедной нагрузок на сооружение.
- Расчет соединений. Возможность расчета в автоматическом режиме. Переход от общей к местной задаче.
- Возможность проектирования стальных элементов по многим нормам, включая ASD, LRFD, CAN, EIA, BS, DIN, EC3 и пр.

**В качестве заключения можно сказать**, что новый подход к проектированию и исследованию позволит широко применять основные научные и практические результаты, полученные с использованием «Транслайн», которые будут заключаться в следующем.

1. После модернизации конструкции опор будут проходить по первому и второму предельному состоянию.
2. Будут предложены методики оптимизационного расчета конструктивных решений, отличающиеся учетом местных климатических условий, позволяющие находить экономически оптимальные параметры. Подобного рода уточняющие исследования методик расчета конструкций с помощью автоматизированного проектирования экспертным организациям, безусловно, необходимы. Техническая диагностика и экспертиза промышленной безопасности включают, кроме расчетов на статическую прочность и на деформацию, расчеты на устойчивость, расчет на собственные (резонансные) частоты и вынужденные колебания металлоконструкции, а также расчеты на усталостную прочность (выносливость). Часто перед экспертами ставятся не узконаправленные проектировочные задачи, а более глобальные, связанные с экспертизой технических систем. В основном это задачи по трем направлениям:
  - экспертиза новых проектов и модернизаций;
  - расследование и выявление причин произошедших аварий, а также обоснование внесения соответствующих изменений в конструкцию;
  - экспертиза с целью продления нормативного срока службы.

3. Применение «Транслайн» значительно облегчает и ускоряет численные эксперименты в научных исследованиях. Применение современного программного комплекса позволяет значительно снизить

Смазнов Д.Н. Использование САПР для решения исследовательских задач при проектировании опор воздушных линий электропередачи

временные и трудовые затраты при оценке напряженно-деформированного состояния реконструируемых сооружений, их усилении, проектировании новых сооружений. Программное обеспечение может быть внедрено в учебный процесс при подготовке специалистов строительных специальностей: в проведении лабораторных и практических занятий по исследованию работы строительных конструкций, в курсовом и дипломном проектировании.

4. Будет предложено рассчитывать опоры по разным уточняющим методикам, которые необходимо исследовать и сформулировать. Предоставляется возможность проводить поиск и анализ различных вариантов проектного решения при изменении отдельных параметров расчетной схемы, не изменяя всей исходной информации, а также проводить оптимизационные расчеты.
5. Будет возможность отказаться от применения действующих унифицированных опор и разработки новых унификаций, уменьшить капиталовложения. Для каждой вновь проектируемой ВЛ разрабатывать серию опор, рассчитанную на конкретные условия. Это, в свою очередь, уменьшит ошибки при проектировании, т.к. проекты на протяжении длительного периода после распада СССР, как правило, не корректировались в связи с изменением национальных нормативно-правовых актов, что не могло не отразиться на их научно-техническом уровне.
6. Расчет конструкции показывает ее практическую реализуемость и дает материал для сметно-экономического расчета. Следует отметить, что результаты по данной работе и указанный выше подход к проектированию опор используется в отдельных организациях, специализирующихся на эксплуатации сетей: «ЭЛТЕЛ Нетворкс», «СевЗап НПЦ Архимет».

### Литература

1. Автоматизированное проектирование высотных сооружений // <http://www.sibpatent.ru/default.asp?khid=50464&all=1&sort=3>
2. Встроенная справка в систему автоматизированного проектирования «SCAD soft» и «Транслайн».
3. Ильичев Н. Расчет и проектирование ВЛ, ОРУ и ВОЛС в среде EnergyCS Line // [http://www.cadmater.ru/articles/article\\_24612.html](http://www.cadmater.ru/articles/article_24612.html)
4. Компания ОАО «ФСК ЕЭС» // <http://www.fsk-ees.ru/>
5. Лавров Ю. Линии электропередачи – 2004: опыт эксплуатации и научно-технический прогресс // Результаты научно-практической конференции. Электронная публикация. <http://www.news.elteh.ru/arh/2004/29/12.php>
6. Металлические конструкции. Общий курс / Учебник для ВУЗов под ред. Е.И. Беленя, М, 1991.
7. Правила устройства электроустановок. Издание 7.
8. Семенко О.В., Патеюк Н.Г., Белоцерковский Л.Я., Костиков В.И. Особенности проектирования ВЛ 35-750 кВ в современных условиях // <http://www.energobud.com.ua>
9. СНиП 2.01.07-85\* «Нагрузки и воздействия»
10. СП 53-102-2004 «Общие правила проектирования стальных конструкций»

*\*Денис Николаевич Смазнов, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*

*Тел. моб. +7-906-250-06-05*

*Эл. почта: mazi8@yandex.ru, towerpole@yandex.ru*