

Вопросы надёжности оборудования в районах повышенной сейсмической активности

Введение в действие ряда документов федерального значения и актуализация нормативно-технической документации в строительстве увеличили уровень проектной надёжности электросетевых объектов, что для отдельных районов РФ привело к повышению уровня проектной сейсмичности. При этом вопросам аттестации электроэнергетического оборудования на сейсмостойкость в ведущих энергетических компаниях отрасли уделяется недостаточное внимание, что может привести к тяжелейшим техногенным и финансовым последствиям.

**Марина ЕРМОШИНА, к.ф.-м.н., начальник,
Петр РОМАНОВ, к.т.н., ГИП,
Сергей КАСАТКИН, начальник сектора,
НИЛКЭС ПЦ «Севзапэнергопроект»,
Любовь КАЧАНОВСКАЯ, к.т.н., заместитель генерального
директора по науке, ОАО «СевЗап НТЦ»**

НАДЁЖНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ

Надёжность функционирования электроэнергетического оборудования закладывается при проектировании и обеспечивается соответствием требованиям действующих нормативно-технических и организационно-распорядительных документов, а также применением современных технических решений, устройств и технологий.

В дальнейшем надёжность работы оборудования реализуется при строительстве и поддерживается при эксплуатации выполнением комплекса мероприятий. Производится мониторинг состояния электросетевых объектов, в том числе своевременная диагностика и оценка технического состояния электроэнергетического оборудования. При выполнении ремонтной программы и техническом перевооружении сетевых объектов

применяются современные технические решения, устройства и технологии. Особое внимание уделяется организации предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, в том числе уменьшению времени ликвидации аварийной ситуации, обеспечению служб эксплуатации аварийным резервом и спецтехникой. За последние годы значительно улучшено оснащение эксплуатирующих организаций, пополнен парк техники линейных бригад, проводятся соревнования и учения по ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Существенные изменения произошли и в нормативном регулировании. В 2002 году вышел федеральный закон № 184-ФЗ «О техническом регулировании», предписавший руководствоваться системой технических регламентов. Вышедший в 2009 году № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» разделил все национальные стандарты и строительные нормы и правила на применяемые на добровольной и обязательной основах, а также предписал к 2012 году осуществить актуализацию строительных норм и правил, в результате применения которых на обязательной основе обеспечить соблюдение требований № 384-ФЗ.

АКТУАЛИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ НОРМ И ПРАВИЛ

В результате актуализации строительных норм и правил наблюдаются общие тенденции, связанные с направлением развития мировой научной школы и сближением с международными стандартами, в том числе Еврокодами.

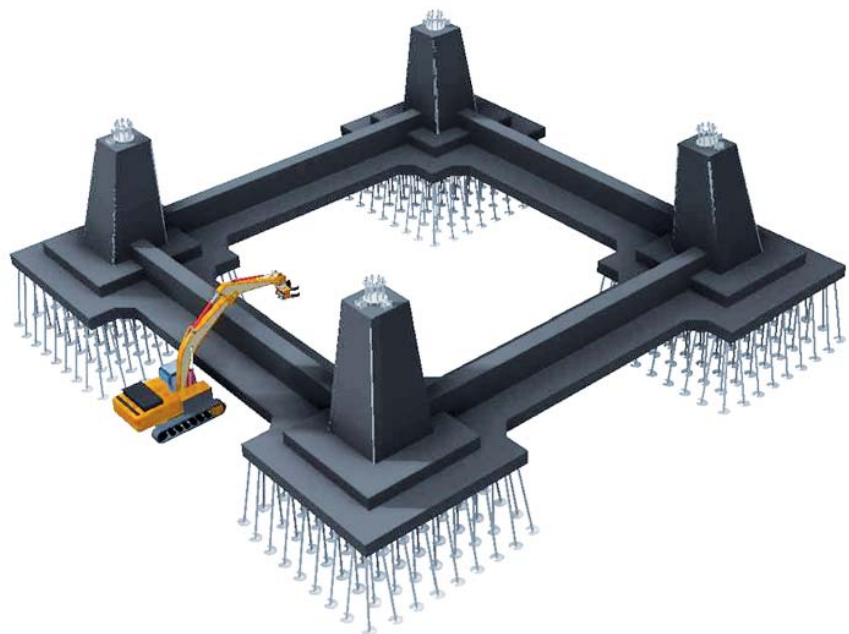
Так же как и в организационно-распорядительных документах ведущих российских энергетических компаний и отраслевых нормах (например, ПУЭ), повышен уровень надёжности проектируемых энергообъектов за счёт увеличения коэффициентов надёжности и ужесточения требований к задаваемым исходным данным.

Необходимость использования для расчётов сложных программно-расчётных комплексов также нашла своё отражение при актуализации, что прежде всего связано со сложностью разрабатываемых конструкций (рис. 1,2).

Рис. 1. Фундамент из ортотропных плит для высотных многогранных опор ВЛ 220 кВ



Рис. 2. Фундамент опоры АТ155а перехода ВЛ 220 кВ через р. Амур

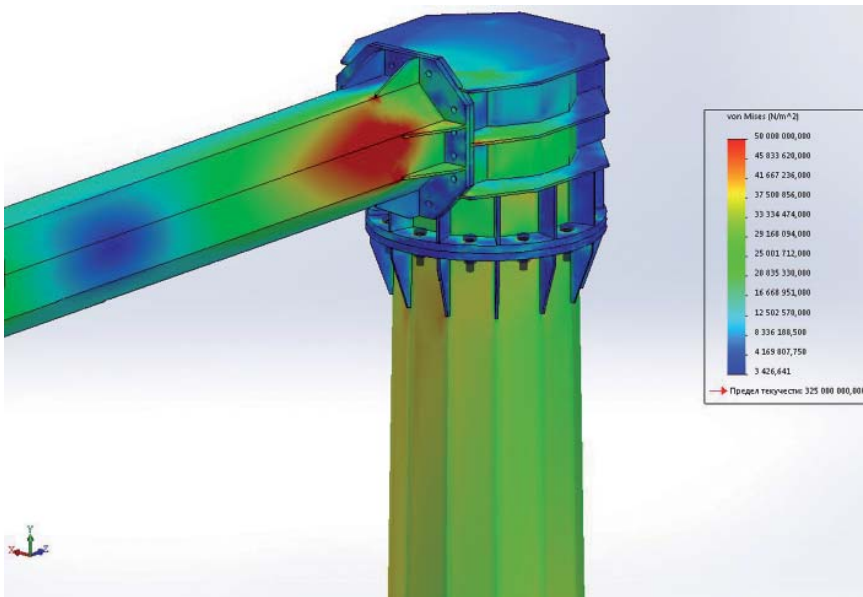


СНиП II-23-81* «Стальные конструкции» предписывал выполнять расчёты инженерными методиками с учётом эффективного использования ЭВМ. Каждый инженер с помощью приведённых в СНиП формул и таблиц мог выполнить расчёты с использованием простых устройств (калькулятора или логарифмической линейки) или написав собственную расчётную программу на ЭВМ. СП 16.13330.2011 «Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*» регламентирует проверку устойчивости стержневых конструкций и определение расчётных длин сжатых элементов пространственных ре-

шётчатых конструкций выполнять с использованием сертифицированных вычислительных комплексов (рис. 3). Параметры и коэффициенты, вычислявшиеся ранее по таблицам в зависимости от исходных данных, должны определяться численными методами.

СНиП 2.02.03-85 «Свайные фундаменты» и СП 50-102-2003 «Проектирование и устройство свайных фундаментов» предписывали выполнение расчётов свай по предельным состояниям обеих групп, в том числе расчёт на совместное действие вертикальных и горизонтальных сил и моментов, инженерными методиками. СП 24.13330.2011

Рис. 3. Карта эквивалентных напряжений в узле конструкции трансформаторного портала ОРУ ПС 330 кВ



«Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85» регламентирует выполнение расчётов только численными методами. Таблицы для определения параметров и коэффициентов также исключены из актуализированной редакции.

СП 52-01-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции», утверждённый взамен СНиП 2.03.01-84*, поддерживает наблюдаемую тенденцию: инженерные методики исключены, расчёты конструкций по прочности, деформациям, образованию трещин должны выполняться методом конечных элементов.

Дальше всех в этом направлении шагнул СП 14.13330.2011 «Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*». Если в СНиП II-7-81* расчётные сейсмические нагрузки определялись инженерными методиками, то в актуализированной редакции отсутствуют даже аналитические методы расчёта! При определении расчётных сейсмических нагрузок на здания и сооружения следует принимать расчётные динамические модели конструкций [1]. Кроме того, проектирование систем сейсмоизоляции и выполнение расчётов сооружений на сейсмические нагрузки, соответствующие уровню максимального расчётного землетрясения (данный расчёт относится к обязательным

при проектировании), следует осуществлять «при научном сопровождении специализированной организации». Данное утверждение фактически вводит монополизм на выполнение расчётов сейсмостойкости зданий и сооружений.

При формировании расчётной модели для определения сейсмостойкости оборудования в первую очередь строится расчётная схема рассматриваемой реальной конструкции. Логикой инженерных расчётов предусмотрено максимальное упрощение расчётной схемы. При построении расчётной динамической модели конструкций рассматривается пространственный характер деформирования сооружения и задаётся пространственная модель сейсмических воздействий. Далее задаются исходные данные для расчётов — сейсмичность площадки строительства, определяются сейсмические нагрузки. Оценка сейсмичности площадки носит приближённый характер как в сейсмологической части, — определение силы землетрясения, так и в вероятностном отношении, — определение возможной частоты сотрясений и интенсивности во времени. Сейсмические нагрузки также определяются приближённо: используются обобщённые спектры ответа. Приближённое определение исходных данных укладывается в логику инженерных расчётов: на их основе строится понятная расчётная

схема, с использованием методик СНиП выполняются расчёты, результаты которых легко проверить. Применение сложных и высокоточных методов расчёта при использовании приближённых исходных данных неэффективно, поскольку не гарантирует параметрической устойчивости решения относительно исходных данных, следовательно, результат может быть получен с очень большой погрешностью. При этом инженерные методики исключены из актуализированных редакций СНиП, что не позволяет с помощью простой расчётной модели проверить результаты численных расчётов.

ПРОЕКТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Следствием идеологии, заложенной при актуализации строительных норм и правил, стало то, что проектное моделирование имеет ограниченную степень достоверности, что в свою очередь приводит к существенным погрешностям в расчётном определении характеристик. Результаты расчётов невозможны в связи с большим количеством задаваемых параметров и приближённым характером исходных данных. Как следствие, повышение отдельных коэффициентов надёжности не приводит к увеличению надёжности энергообъектов, а единственной объективной проверкой результатов расчётов является проведение механических испытаний конструкций.

В качестве примера можно привести конструкцию многогранной опоры для ВЛ 500 кВ — ПМГ500-11.232. Одноцепная двухстоечная опора была разработана для применения на конкретной ВЛ 500 кВ и заменила предусмотренную проектом опору базовой серии («типовую», разработанную по заказу ОАО «ФСК ЕЭС»). У специалистов возникли вопросы относительно конструктива, однако было принято решение не проводить испытания. Опора ПМГ500-11.232 была рассчитана с использованием программно-расчётного комплекса, правильность принятых технических решений подтверждена результатами расчётов. После поставки опор на трассу представители заказчика, осуществляющие надзор за строительством — специалисты ОАО «ЦИУС ЕЭС», а

также эксперты исполнительного аппарата ОАО «ФСК ЕЭС», — на стояли на проведении испытаний, которые прошли неуспешно, — произошло разрушение траверсы средней фазы опоры. Было предписано после усиления конструкции провести повторные испытания, при проведении которых также произошло разрушение траверсы, но уже в другом расчётном режиме (рис. 4). При третьих испытаниях при нагружении были погнуты тросостойки. Несмотря на выполненные в программно-расчётном комплексе расчёты, подтверждающие соответствие опоры требованиям нормативно-технической документации, простой инженерный расчёт показал, что прочность траверсы недостаточна, а конструкция опоры ПМГ имеет ряд существенных недостатков, что и подтвердили результаты механических испытаний.

Использование программно-вычислительных комплексов сопряжено с рядом проблем. Для решения каждой специфической расчётной задачи, как правило, применяется один комплекс, обеспечивающий решение всех возникающих в этой области задач. Распространение программного обеспечения через официального российского представителя часто приводит к монополизму в определённой отрасли, когда организации вынуждены обращаться к официальному представителю за решением определённых задач, вносить регулярные платежи за техническую поддержку и лицензирование, обучать персонал. Идеология программного обеспечения внедряется через стандарты организации по отдельным направлениям деятельности, что приводит к нарушению антимонопольного законодательства. Систематизированное обучение работе в программно-расчётных комплексах в ведущих инженерных ВУЗах страны без уделения должного внимания вопросам построения расчётных схем и оценке результатов расчётов приводит к снижению квалификации инженерных кадров. Молодые специалисты являются пользователями расчётных программ, не понимая физической сущности решаемых задач. Кроме того, подавляющее большинство программно-вычислительных комплексов разработано в

США, что ставит получение и продление лицензий на их применение в зависимости от политической обстановки в мире.

СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Вопросы теоретической и фактической оценки сейсмостойкости в нашей стране были впервые подняты применительно к сооружениям самого высокого уровня ответственности — атомным электростанциям. Впервые сейсмостойкость энергетических сооружений, оборудования и трубопроводов анализировалась в середине 70-х годов прошлого века применительно к Армянской АЭС. Были разработаны и введены в действие нормы проектирования сейсмостойких атомных станций с учётом рекомендаций МАГАТЭ, и после катастрофического землетрясения в Армении в 1988 году были откорректированы требования к сейсмостойкости АЭС и других атомных объектов.

На сегодняшний день требования нормативно-технической документации в части АЭС регламентируют многоуровневый анализ. На стадии проектирования выполняются расчёты (инженерными методиками и в сложных программно-расчётных комплексах). После изготовления оборудования проводятся стендовые испытания на сейсмостойкость. При вводе в эксплуатацию выполняются поэлементные проверки сейсмостойкости, включая экспериментальное определение динамических характеристик в реальных условиях с проведением при необходимости компенсирующих мероприятий [2]. Комплексный подход к оценке фактической сейсмостойкости увеличивает надёжность АЭС при сейсмических воздействиях.

Для обеспечения сейсмостойкости электроэнергетического оборудования в международной практике применяются рекомендации СИГРЭ [3] и Института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) [4], предписывающие при-

Рис. 4. Неуспешные испытания опоры типа ПМГ для ВЛ 500 кВ (разрушена траверса)



менение сейсмоизоляции (специальных демпфирующих устройств, рис. 5), учёт совместной работы конструкций с грунтом основания, а также проведение натурных испытаний оборудования подстанций на сейсмостойкость.

После землетрясения в Японии был проведён анализ разрушений на подстанциях [5], который показал, что вывод оборудования из строя произошёл во многих случаях из-за разрушения или подвижек стальных элементов крепления. Для увеличения сейсмостойкости оборудования рекомендовано:

- увеличить количество данных, получаемых в результате испытаний на сейсмостойкость (в том числе проводить испытания для разных частот сейсмических воздействий);
- увеличить объём проводимых исследований (на испытательном стенде с шестью степенями свободы движения);
- проводить испытания комплектных изделий (совместно с элементами крепления).

В России сейсмостойкость энергетического оборудования обеспечивается нормативным регулированием. Как следствие актуализации нормативно-технической документации, увеличен проектный уровень надёжности. В частности, уровень сейсмичности района строительства может быть повышен по грунтовым условиям и по уровню ответственности сооружения. При проектировании электросетевых объектов впервые возникла ситуация, когда расчётный уровень сейсмичности района строительства равен 10 баллам, а в районе Ленинградской АЭС, уровень сейсмичности района которой составлял ранее 5 баллов, он установлен равным 7 баллам. Таким образом, к оборудованию, поставляемому на подстанциях и воздушных линиях электропередачи в районе ЛАЭС, предъявляются дополнительные требования по сейсмостойкости.

Испытания высоковольтного оборудования на сейсмостойкость, в том числе российского производства, проводятся в крупных европейских и международных испытательных центрах. Испытания конструкций и оборудования для среднего и низкого классов на-

Рис. 5. Сейсмоизоляция трансформатора 460 кВ (установка на демпферы)



пряжения проводятся в неспециализированных, часто не аккредитованных, лабораториях. Вопрос испытаний электросетевого оборудования неоднократно поднимался ведущими энергетическими компаниями России, тем не менее в техническом задании на проектирование Федерального испытательного центра ОАО «Россети» отсутствуют требования к стенду для испытаний на сейсмостойкость.

В настоящее время вопросам сейсмичности в электроэнергетике уделяется недостаточное внимание. В России отсутствует система аттестации и сертификации электросетевого оборудования, применяемого в зонах повышенной сейсмической активности. Возникновение аварийных ситуаций, связанных с природными катаклизмами, приводит к тяжелейшим техногенным последствиям, финансовые последствия таких аварийных ситуаций превосходят любые оценки.


В сложившейся ситуации высший законодательный орган РФ поднял вопрос о необходимости подтверждения сейсмической устойчивости. Комитетом Государственной Думы РФ по промышленности дано указание ОАО «Газпром» об обязательности проведения сейсмических испытаний оборудования, материалов и строительных конструкций, применяемых в газовой отрасли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нормативное регулирование обеспечивает надёжность функционирования электросетевого оборудования. Актуализация строительных норм и правил и исключение инженерных методик расчётов

привели к тому, что единственной объективной проверкой результатов расчётов является проведение механических испытаний конструкций. Необходим комплексный подход: выполнение расчётов инженерными методиками и уточнение результатов в программно-расчётных комплексах.

Для обеспечения возможности проверки результатов расчётов инженерные методики необходимо включить в нормативно-техническую документацию энергетических компаний, например в качестве стандартов организации.

Для обеспечения сейсмостойкости энергетического оборудования необходимо включение в систему аттестации и сертификации ведущих компаний энергетической отрасли требований по проведению испытаний энергетического оборудования на сейсмостойкость. Для проведения испытаний необходимо создание в России современного испытательного центра, который сможет обеспечить подтверждение требуемой сейсмостойкости оборудования на международном уровне. 

ЛИТЕРАТУРА

1. Айзенберг Я.М. *Актуализированная редакция и проблемы дальнейшего развития СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах / Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*, № 6, 2011.
2. Емельянова А.Д., Казновский А.П., Казновский П.С., Касьянов К.Г., Рясный С.И. *Об объёме и составе расчётно-экспериментальных обследований сейсмостойкости оборудования АЭС / Электрические станции*, № 1, 2014.
3. *TB 532 CIGRE WG B3.23 «Substation Uprating and Upgrading»*, April, 2013.
4. *IEEE 693-2005 IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations*.
5. I. Ohno, T. Ito, T. Kobayashi. *Seismic damage situation of substation equipment caused by the Great East Japan Earthquake and future action / CIGRE Symposium «Best Practice in Transmission and Distribution in a Changing Environment»*, Auckland, New Zealand, September, 2013.