

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ТВЕРДОЙ RIP-ИЗОЛЯЦИИ. ИСПЫТАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВВОДОВ 220-500 кВ НА СТОЙКОСТЬ К ВНЕШНИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Кассихин С.Д., Сипилкин К.Г.,
Славинский А.З., докт. техн. наук, ЗАО «Мосизолятор»

ЗАО «Мосизолятор» в 2002-2004 гг. разработало собственную технологию промышленного производства RIP-изоляции [1]. RIP (rezin impregnated paper — бумага, пропитанная смолой) — аббревиатура, соответствующая публикации МЭК 137. В 2002-2005 гг. были разработаны вводы на напряжения 35-220 кВ с внутренней RIP-изоляцией и двумя вариантами внешней изоляции: фарфоровой и полимерной. В 2006 г. разработаны вводы на 330-500 кВ. В настоящее время серийно выпускаемые высоковольтные вводы с RIP-изоляцией являются лучшим видом проходных изоляторов как с точки зрения характеристик изоляции, так и эксплуатационных издержек и экологии.

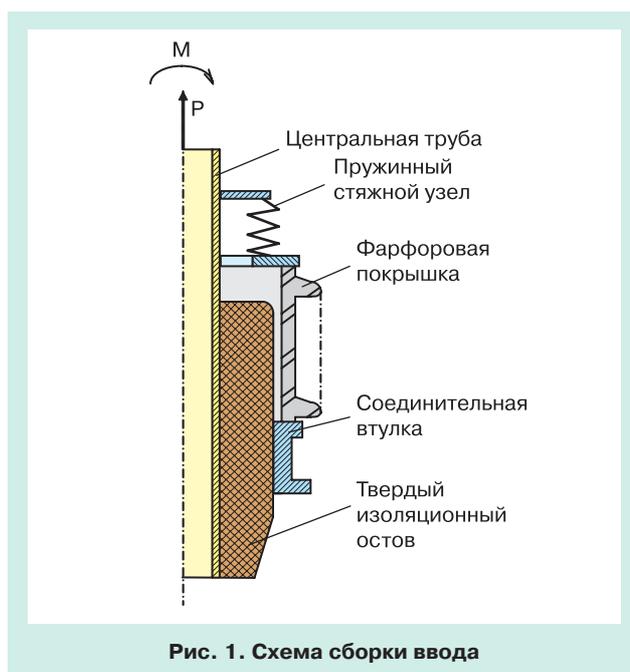
До начала серийного производства проводилась отработка технологических режимов изготовления твердой изоляции и комплексные испытания опытных образцов вводов при влиянии электрических и термомеханических воздействий для оценки надежности и ресурса.

Для высоковольтных вводов с твердой внутренней изоляцией и внешней изоляцией в виде фарфоровых покрышек применяется схема сборки, приведенная на рис. 1.

Схема сборки предусматривает наличие твердого остова как единого целого с центральной трубой и соединительной втулкой, насаженной на остов методом горячей посадки.

Такая схема хорошо себя оправдала для вводов 110 кВ/800 А, о чем свидетельствует положительный 30-летний опыт эксплуатации. Такая же схема применена и при разработке вводов на большие токи и напряжения.

В изоляции ввода имеются внутренние остаточные механические напряжения $\sigma_{вн}$, обусловленные факторами, связанными с технологией изготовления. В экс-



плуатации возникают дополнительные термомеханические напряжения σ_T при изменении температуры наряду с чисто механическими напряжениями σ_p от воздействия внешних силовых нагрузок (усилия Р и момент М)

$$\sigma = \sigma_{вн} + \sigma_T + \sigma_p.$$

Рассмотрим технологию изготовления изоляционных остовов и возникающих при этом внутренних напряжений.

Полимеризация

После пропитки бумажного остова (рис. 2) температура в камере полимеризации повышается по определенному закону (рис. 3).

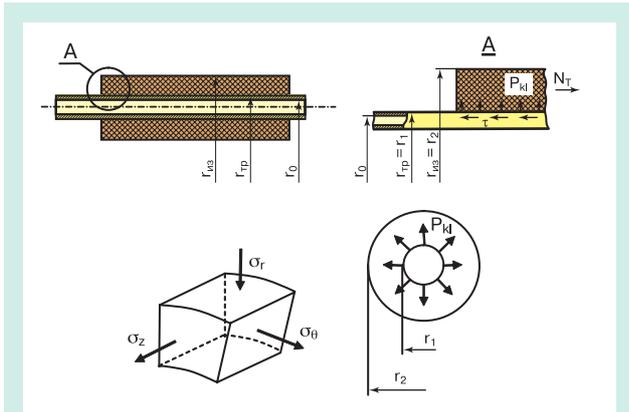


Рис. 2. Остов с центральной трубой до токарной обработки

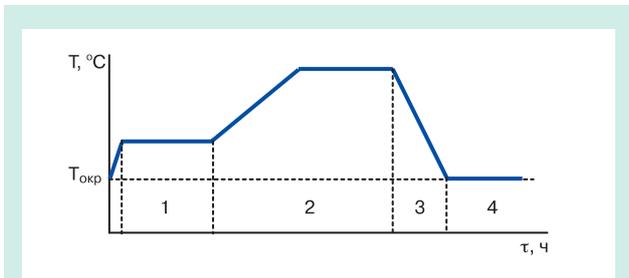


Рис. 3. Изменение температуры в процессе изготовления изоляционного остова (условно)
 1 — пропитка; 2 — полимеризация;
 3 — охлаждение; 4 — токарная обработка и сборка

В процессе подъема температуры начинается гелеобразование и далее происходит отверждение (сшивка молекул), сопровождающееся усадкой. Известно, что компаунд становится твердым, когда произойдет сшивка ~50 % молекул. Усадка сопровождается возникновением контактного давления между изоляцией и центральной трубой $P_{к1}$.

Отверждение эпоксидной смолы (образование сетчатой структуры молекул) характеризуется скоростью процесса, протекающего во времени. При малой скорости процесса после каждого элементарного акта возникновения связи вероятность перехода молекулярной системы к новому равновесию (конформационному набору) значительно большая, чем при быстротекущем процессе. В последнем случае образующиеся сшивки фиксируют не успевшие перестроиться в соответствии с новым энергетическим состоянием неравновесные молекулярные структуры. Перенапряжения отдельных связей таких структур обуславливают повышенную жесткость материала и являются потенциальными источниками образования в нем трещин, особенно при охлаждении. Отсюда следует, что снижение скорости, то есть увеличение продолжительности процесса отверждения, способствует образованию менее склонных к растрескиванию компаундов со стабильными физико-механическими и диэлектрическими свойствами [2, 3].

Охлаждение

После выдержки при температуре полимеризации остов охлаждается до температуры окружающей среды $T_{окр}$. Происходит радиальное и осевое укорачивание изоляции. Контактное давление $P_{к1}$ увеличивается и возникают касательные (продольные) напряжения τ между изоляцией и трубой за счет разницы температурных коэффициентов линейного расширения изоляции и трубы ($\alpha_{из} > \alpha_{тр}$).

Внутреннее напряжение, возникающее из-за усадки и изменения температуры $\sigma_{вн} = \sigma_y + \sigma_T$.

Оценка предельных величин при быстром процессе полимеризации и охлаждении, если пренебречь релаксацией напряжений, проводится по формулам

$$\sigma_y = \epsilon E_1 (1 - \mu),$$

$$\sigma_T = \frac{(\alpha_{из} - \alpha_{тр}) \Delta T E_1}{1 - \mu},$$

где ϵ — величина усадки в о.е. для эпоксидного компаунда (0,03-0,05, если не принимать специальные меры — рецептура, температура, демпфирующий слой и т.д.);

$\alpha_{из} = (40-55) \cdot 10^{-6} 1/^\circ C$ — экспериментальные значения коэффициента линейного расширения изоляции ($40 \cdot 10^{-6}$ — по оси Z);

E_1 — модуль упругости изоляции;

μ — коэффициент Пуассона;

ΔT — изменение температуры во времени или в слое изоляции.

Оценку касательного τ и продольного σ_z напряжений получим, исходя из условия отсутствия сдвига изоляции относительно трубы.

При остывании труба и изоляция укорачиваются. Так как $\alpha_{из} > \alpha_{тр}$, то изоляция должна была бы укоротиться больше, чем труба, но этому препятствуют силы адгезии и трения между трубой и изоляцией и между слоями изоляции. Таким образом, труба мешает свободному температурному укорочению изоляции и тем самым вызывает в изоляции напряжения растяжения в граничной области, непосредственно прилегающей к трубе.

Очевидно, что по условию отсутствия сдвига суммарные, то есть вызванные охлаждением и возникающими при этом усилиями, изменения длин трубы и прилегающих слоями изоляции одинаковы $\Delta l_{тр} = \Delta l_{из}$.

При этом

$$\Delta l_{тр} = \alpha_{тр} \Delta T l_{тр} - \beta_{тр} N_{Тр},$$

$$\Delta l_{из} = \alpha_{из} \Delta T l_{из} + \beta_{из} N_{Тиз},$$

где $\beta_{тр} = l_{тр} / (E_{тр} \cdot F_{тр})$, $\beta_{из} = l_{из} / (E_{из} \cdot F_{из})$ — коэффициенты податливости,

$F_{тр}$ и $F_{из}$ — приведенные площади трубы и изоляции.

Таким образом,

$$\alpha_{тр} \Delta T l_{тр} - \beta_{тр} N_{Тр} = \alpha_{из} \Delta T l_{из} + \beta_{из} N_{Тиз},$$

откуда, с учетом равновесия продольных сил $N_{Тр} = N_{Тиз} = N_T$, действующих на трубу и изоляцию, и $l_{Тр} = l_{из}$ величина термической силы

$$N_T = \frac{(\alpha_{тр} - \alpha_{из}) \cdot \Delta T \cdot E_{тр} \cdot F_{тр}}{1 + (E_{тр} \cdot F_{тр}) / (E_{из} \cdot F_{из})}.$$

Тогда среднее значение напряжения сдвига на краю трубы

$$\tau = N_T / S_a.$$

Средние значения нормальных напряжений в изоляции на краю трубы

$$\sigma_z = N_T / F_a,$$

где S_a и F_a — «активная» площадь граничной поверхности и поперечного сечения изоляции.

Расчетная оценка показывает, что значения предельных напряжений при резком охлаждении соизмеримы с прочностью твердой изоляции, что может привести к появлению микротрещин. Наиболее критичной при охлаждении оказывается область А (см. рис. 2) из-за большой охлаждающей поверхности металлической трубы. Дальнейшее развитие микротрещины возможно при циклическом изменении температуры при хранении и эксплуатации. Для снижения величины внутреннего напряжения необходимо проводить процессы полимеризации и охлаждения до $T_{окр}$ достаточно медленно, что определяется как рецептурой компаунда, так и задаваемыми температурными режимами в камере полимеризации. Значение имеет и плотность намотки бумаги как наполнителя для эпоксидного связующего.

Токарная обработка и сборка

При обточке происходит уменьшение сечения изоляции, что приводит к увеличению величин внутренних напряжений при условии сохранения усилий сдвига и контактного давления между центральной трубой и изоляцией.

Затем при температуре изоляционного остова, равной температуре окружающего воздуха, производится насадка на остов нагретой до температуры 250-300 °С соединительной втулки (рис. 4, а). В результате при остывании до $T_{окр}$ соединительная втулка оказывается плотно насаженной на остов с натягом ~ 0,3 мм. Натяг — это есть разность между наружным диаметром остова и внутренним диаметром соединительной втулки в исходном состоянии до посадки $\Delta_n = d_{ост} - d_{вт.}$ При этом возникают усилия контактного давления $P_{к2}$ между остовом и втулкой (рис. 4, б).

В дальнейшем в процессе хранения и эксплуатации при повышении температуры $P_{к2}$ растет из-за разницы в коэффициентах линейного расширения изоляции $\alpha_{из}$ и втулки $\alpha_{вт.}$. Так как $\alpha_{из} > \alpha_{вт.}$, то вблизи втулки из-за расширения изоляции, большего по сравнению с втулкой, будет наблюдаться область растяжения. В результате проведенных расчетов методом конечных элементов с помощью программы «CosmosWorks» установлены четкие границы этой области растяжения (рис.4, б и рис. 5 как пример). В области растяжения возникают сдвигающие напряжения и напряжения отрыва [4]. Возможно расслоение по границе «алюминиевая обкладка – компаунд» из-за относительно слабой адгезионной прочности алюминия к компаунду и образование микроскопической полости. Это при воздействии электрического напряжения может привести к возникновению частичных раз-

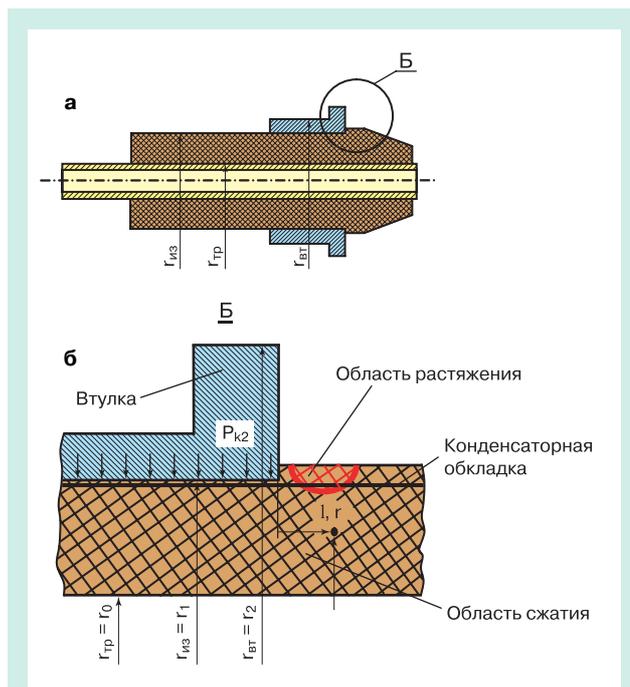


Рис. 4. Остов в сборе с центральной трубой и насаженной втулкой

рядов и далее к электрическому пробою. Особенно это характерно для крупногабаритных вводов 220 кВ и выше. Специально проведенные опыты с вводами 220 кВ это полностью подтвердили: после проведения испытаний на теплоустойчивость наблюдались при высоковольтных испытаниях частичные пробои наружных слоев в указанной области.

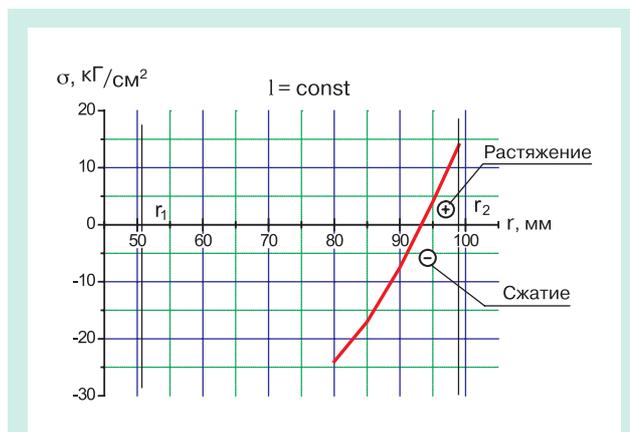


Рис. 5. Изменение напряжения в наружных слоях остова по радиусу на расстоянии l от втулки

Найдено конструктивное решение, усиливающее адгезионную прочность путем перфорации обкладки из алюминиевой фольги, что исключило при высоковольтных испытаниях нарушение электрической прочности в указанной области [5].

Сохранение электрических параметров твердой изоляции в эксплуатации при температурных воздействиях может быть предсказано только с учетом внутренних механических напряжений, возникающих в

изоляционном остоле. Эти напряжения должны быть меньше разрушающих напряжений при наиболее низкой эксплуатационной температуре T_{\min} и наиболее высокой T_{\max} .

Для выбора схем испытаний и величин испытательных нагрузок проведем качественное рассмотрение и оценку деформаций и давлений, возникающих в элементах остола с применением формул Ляме для толстостенных цилиндров и обобщенного закона Гука для объемного напряженного состояния. Начальные давления P_{k1} и P_{k2} , напряжения σ_r , σ_θ определяются по формулам

$$P_k = \frac{\Delta}{2} \left[\frac{r_1}{E_1} \left(\frac{r_1^2 + r_0^2}{r_1^2 - r_0^2} - \mu_1 \right) + \frac{r_1}{E_2} \left(\frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} + \mu_2 \right) \right]^{-1}$$

$$\sigma_{\theta,r} = \frac{P_k r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 \pm \frac{r_2^2}{r_1^2} \right),$$

где r_0, r_1, r_2 — см. рис. 2 и 4;

μ_1, μ_2 — коэффициенты Пуассона соответственно для материала трубы и остола (см. рис. 2) или остола и втулки (см. рис. 4);

$\Delta = \Delta_y + \Delta_T$ — суммарная деформация за счет начальной усадки и изменения температуры.

Для определения механической прочности с учетом остаточных напряжений в изоляции были использованы специальные образцы, вырезанные из остовов. Начальные давления могут быть оценены путем измерения максимальных усилий P сдвига изоляции относительно трубы и втулки

$$P_k = P / (f \cdot S),$$

где f — коэффициент трения;

S — площадь соприкосновения изоляции с трубой или втулкой.

Схема, иллюстрирующая деформации Δ в процессе охлаждения на торцах изоляции, представлена на рис. 6. Некоторые схемы испытаний образцов на механическую прочность представлены на рис. 7.

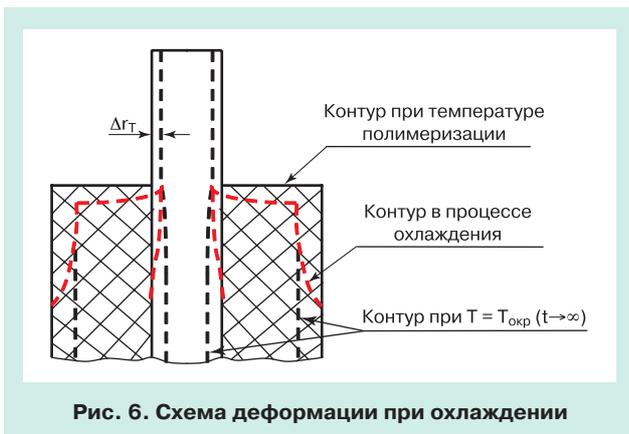


Рис. 6. Схема деформации при охлаждении

Для уменьшения влияния сил трения поверхности смазывались маслом.

При $\Delta_{ГТ} = \Delta_r$ напряжения в области края изоляции, где труба выходит из изоляции, можно считать эквивалентными.

Как показали испытания, разрыв (образование продольной трещины) изоляции или сдвиг изоляции

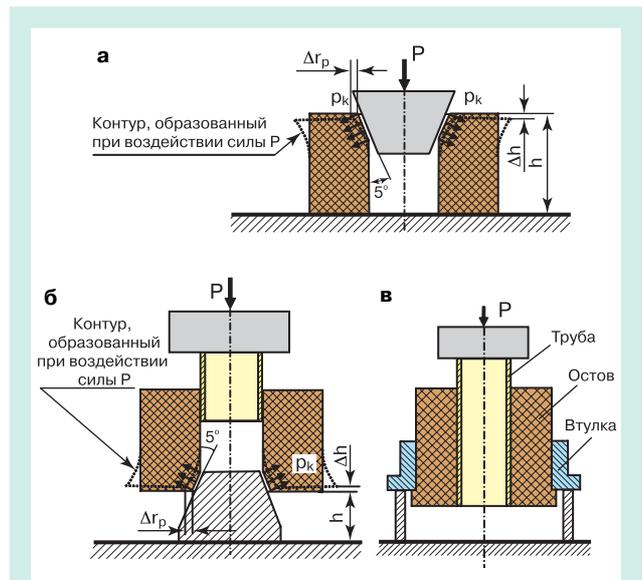


Рис. 7. Схемы испытаний образцов на механическую прочность

относительно трубы или втулки происходил при усилиях P и деформациях Δr , значительно превосходящих возможные при эксплуатации расчетные значения термических сил N_T и деформаций. Если считать, что длительная механическая прочность составляет 50% от кратковременной, что характерно для полимерных материалов [6], то отношение P/N_T должно быть по крайней мере больше двух, что заведомо выполнялось.

Проведение испытаний натуральных образцов высоковольтных вводов

ЗАО «Мосизолятор» к испытаниям вводов новых конструкций привлекал ведущие институты и в том числе предприятия аэрокосмического и оборонного комплексов, располагающие необходимым испытательным оборудованием, стендами и установками. Программы проведения испытаний трансформаторных вводов на напряжение 220 кВ/2000 А и 500 кВ/2500 А с твердой внутренней RIP-изоляцией и фарфоровой внешней изоляцией согласовывались с аккредитованным Испытательным центром высоковольтного электрооборудования ГУП ВЭИ.

Испытания ввода ГКТII-30-500/2500 О1 на стойкость к изменению температуры окружающей среды в диапазоне минус 60 — плюс 100 °С проводились на предприятии ОАО МКБ «Факел» им. П.Д. Грушина в климатическом зале в термовлагокамере УС 62-70100 (рис. 8) после приемочных испытаний на заводе с измерением уровня частичных разрядов (ЧР).

Непрерывный контроль температуры велся по шести контрольным точкам с помощью датчиков типа УС 545-А и самопишущего регистрирующего моста типа КСМ-4. Места установки датчиков УС 545-А указаны на рис. 9.

В процессе испытаний реализованы режимы, указанные в программе. Средний градиент повышения температуры в камере, с массой изделия 2210 кг, в диапазоне от -60 °С до 100 °С составил 0,43 град/мин.

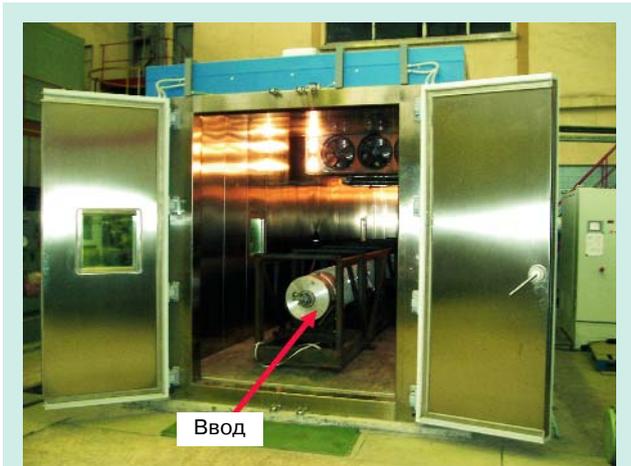


Рис. 8. Размещение ввода перед испытаниями в термовлагокамере

Ввод типа ГКТII-30-500/2500 О1 в упаковке.
Общая масса с упаковкой — 2210 кг

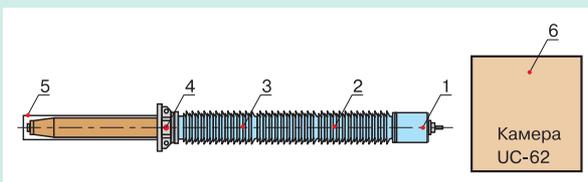


Рис. 9. Места расположения датчиков типа ИС 545-А на вводе типа ГКТII-30-500/2500 О1

Габаритные размеры ввода:
длина — 7965 мм, диаметр остова — 320 мм,
расчетная масса ввода — 1320 кг

Средний градиент понижения температуры в камере, с массой изделия 2210 кг, в диапазоне от +100 °С до -60 °С составил 0,35 град/мин.

Температурные воздействия на ввод осуществлялись четырьмя пятицикловыми постепенными изменениями температуры окружающей среды с выдержкой в течение 6 ч при максимальной +100 °С и минимальной -60 °С температуре.

После каждого пятициклового температурного воздействия производился внешний осмотр и контрольные высоковольтные испытания.

Согласно ГОСТ 20.57.406-81 п. 2.20.5 критерием стойкости ввода к постепенным изменениям температуры среды является сохранение соответствия его параметров требованиям Технических условий после двух следующих друг за другом температурных циклов. Применявшееся в этих исследованиях двадцатицикловое температурное воздействие проводилось для получения сведений о ресурсе ввода.

Общее число циклов, равное двадцати, выбрано из следующих соображений.

Ресурсная характеристика твердой изоляции зависит от условий эксплуатации: пределов изменения рабочей температуры и возникающих при этом термомеханических напряжений. Рассматривая термомеханические напряжения, возникающие в изоляции

при изменении температуры только в области упругих деформаций, имеем

$$\sigma \approx \alpha E \Delta T.$$

Число циклов температурных изменений при испытаниях может быть обосновано, если считать, что для остова как твердого тела при малоцикловом нагружении $N \leq 10000$ справедливо соотношение между числом циклов до разрушения и величиной σ

$$\sigma^m N = \text{Const}.$$

Если исходить из вышеприведенных выражений, число циклов $N_{и}$ при испытаниях, равносильное числу циклов $N_{р}$ в рабочем режиме, составит

$$N_{и} = \frac{N_{р}}{(\Delta T_{и}/\Delta T_{р})^m} \approx 20,$$

где $m = 3-7$,

$\Delta T_{и}/\Delta T_{р} = (4-5)$ — отношение перепада температур при испытании $\Delta T_{и}$ к перепаду температур в рабочем режиме $\Delta T_{р}$;

$N_{р} = (\text{число дней в году}) \times (\text{число лет эксплуатации}) \approx 10000$.

Принималось, что ежедневно на протяжении 25-30 лет эксплуатации происходит циклическое изменение температуры: один цикл за сутки с перепадами $\Delta T_{р} = 20-40$ °С («утро-день» — подъем, «вечер-ночь» — снижение).

Отметим, что выбор числа испытательных циклов, равным 20, носит довольно условный характер, поскольку явление малоциклового усталости твердой изоляции мало изучено, строго не определены пределы применимости формулы и значения постоянной m .

Вывод по результатам испытаний. Ввод ГКТII-30-500/2500 О1 удовлетворяет требованиям ГОСТ 16962.1-89, ГОСТ 20.57.406-81. Тот факт, что для ввода после проведения температурных воздействий, состоявших из 20 циклов постепенного изменения температуры в диапазоне минус 60 — плюс 100 °С, не нарушалась его целостность и параметры ввода оставались в пределах величин, нормируемых Техническими условиями ТУ 3493-020-05758090-05, указывает на достаточно высокий ресурс ввода по отношению к изменениям температуры окружающей среды.

Вибрационные испытания ввода ГКТII-45-220/2000 О1 по проверке сейсмостойкости проводились на лабораторной базе Центра исследований прочности Центрального научно-исследовательского института машиностроения Федерального космического агентства в декабре 2006 г. (орган по сертификации ракетно-космической техники и машиностроительной продукции на прочность с правом проведения сертификационных испытаний «ЦНИИ машиностроения»).

Вибрационные испытания ввода ГКТII-45-220/2000 О1 включали в себя:

- испытания по определению амплитудно-частотных характеристик (АЧХ);
- испытания на воздействие вибрационных нагрузок, соответствующих землетрясению в 9 баллов.

Испытания проводились как методом сканирования частоты, так и на фиксированных частотах.

В качестве возбуждающего оборудования применялась электрогидравлическая вибрационная установка (ЭГВУ) «Гидропульс» фирмы Шенк с толкающим усилием 20 т с частотном диапазоне 0-200 Гц.

При испытаниях изделие вывешивалось в стапеле стенда на маятниковой подвеске. Общий вид испытаний приведен на фото рис. 10.



Рис. 10. Общий вид испытаний ввода ГКТII-45-220/2000 O1 на установке ЭГВУ

Схема мест установки виброизмерительных преобразователей (ВИП) и их ориентация показаны на рис. 11.

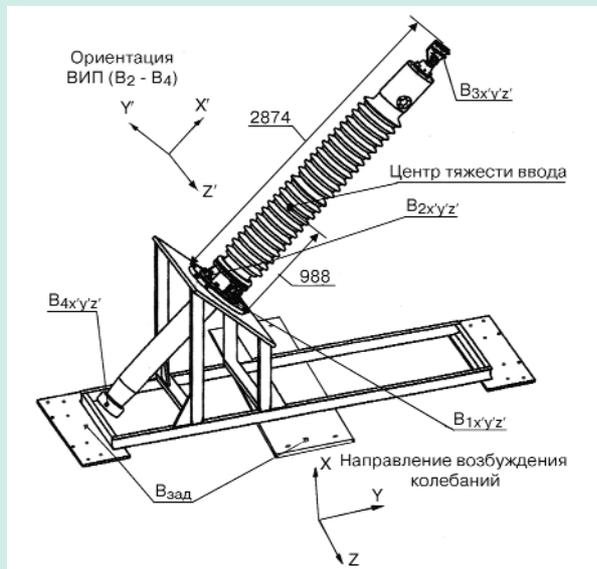


Рис. 11. Схема расстановки ВИП и их ориентация на вводе ГКТII-45-220/2000 O1
Масса ввода — 400 кг, масса подставки — 500 кг

Возбуждение колебаний осуществлялось в горизонтальных направлениях (последовательно по осям Y и Z).

При этом регистрировались величины виброперегрузок в трех направлениях: X, Y и Z (X', Y', Z').

Частотные испытания проводились в диапазоне 1-30 Гц с уровнем виброперегрузки, минимально достаточным для достижения качественных записей процесса в отдельных точках изделия.

Возбуждение колебаний при определении амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) осуществлялось в направлении Y с регистрацией виброперегрузок в направлениях (X, Y, Z) и (X', Y', Z').

Уровень виброперегрузки задавался и контролировался в месте стыка ввода с оснасткой (точка B₁). Время нагружения на каждой фиксированной частоте составляло 60 сек., при сканировании скорость составляла 1 окт./мин.

Уровни виброперегрузок в направлении оси Y, заданные вибростендом при определении АЧХ, приведены в табл. 1.

Вибропрочностные испытания ввода проводились в диапазоне частот 1-30 Гц на дискретных частотах, выбранных на основании анализа результатов по определению АЧХ на режимах, соответствующих землетрясению 9 баллов по шкале MSK-64.

Возбуждение колебаний осуществлялось последовательно в направлении осей Y и Z с регистрацией виброперегрузок в трех направлениях по осям X, Y и Z.

Результаты испытаний по определению АЧХ представлены в табл. 2.

После проведения испытаний в горизонтальных направлениях (по осям Z и Y) был проведен анализ показателей вибродатчиков, установленных в месте крепления ввода к оснастке. Эта точка является местом задания и контроля виброперегрузки в направлениях X, Y и Z.

Показания этих датчиков приведены в табл. 3.

Анализ показал, что при возбуждении колебаний как по оси Y, так и по оси Z, изделие нагружается и в направлении оси X. Уровень перегрузки при этом составляет примерно 0,7 от перегрузок в горизонтальных направлениях, что соответствует нормативным. При этом следует учесть, что фактическое время нагружения по оси X удваивается. Исходя из этого, испытания по оси X не проводились.

В процессе испытаний за изделием осуществлялся визуальный контроль, а после завершения испытаний был проведен осмотр ввода и контрольные испытания, включающие воздействия консольной нагрузкой и высоковольтные испытания.

Вывод по результатам вибрационных испытаний

Определены резонансные частоты ввода ГКТII-45-220/2000 O1. Проведено вибронгружение ввода виброперегрузками, имитирующими землетрясение силой 9 баллов по шкале MSK-64. Изменений в основных параметрах ввода не обнаружено. Ввод удовлетворяет требованиям ТУ 3493-008-05758090-03 и ГОСТ 16962.2-90 по сейсмостойкости при интенсивности землетрясений 9 баллов по шкале MSK-64.

Таблица 1

Уровни виброперегрузок при определении АЧХ

Частота (диапазон частот), Гц	1	2	3	4	5-10	10-30
Виброперегрузка n, g	0,05	0,10	0,10	0,10	0,15	0,10
Время нагружения	60 с	60 с	60 с	60 с	Октава в минуту	

Таблица 2

Результаты испытаний по определению АЧХ

№ ВИП \ f, Гц	1	2	3	4	5-10	10-30
n (g) стенд	0,05	0,10	0,10	0,10	0,15	0,10
B1X	0,07	0,09	0,08	0,17	7,5 Гц (0,09 g)	21 Гц (0,09 g)
B1Z	0,01	0,03	0,04	0,05	7,5 Гц (0,03 g)	21 Гц (0,05 g)
B1Y	0,10	0,12	0,11	0,13	7,5 Гц (0,15 g)	21 Гц (0,10 g)
B2X'	0,15	0,10	0,12	0,14	7,5 Гц (0,30 g)	21 Гц (0,65 g)
B2Z'	0,08	0,15	0,10	0,12	7,5 Гц (0,17 g)	21 Гц (0,65 g)
B2Y'	0,10	0,04	0,04	0,04	8 Гц (0,16 g)	21 Гц (0,5 g); 30 Гц (0,28 g)
B3X'	0,10	0,17	0,18	0,19	8 Гц (0,37 g)	21 Гц (0,7 g)
B3Z'	0,09	0,12	0,10	0,12	7,5 Гц (1,4 g)	21 Гц (0,28 g)
B3Y'	0,18	0,22	0,18	0,19	7,5 Гц (1,8 g)	21 Гц (0,45 g); 29 Гц (0,25 g)
B4X'	0,15	0,23	0,21	0,24	7,5 Гц (0,25 g)	22 Гц (0,56 g)
B4Y'	0,03	0,03	0,01	0,02	7,5 Гц (0,85 g)	21 Гц (1,4 g); 30 Гц (1,2 g)
B4Z'	0,02	0,03	0,04	0,02	7,5 Гц (1,5 g)	22 Гц (1,8 g)

Таблица 3

Показания вибродатчиков

Направление возбуждения колебаний	№ датчиков	Частота, f, Гц													
		1	2	3	4	5	9	10	12	14	16	18	24	26	28
		Виброперегрузка n, g													
Ось Y	B1Y	0,25	0,50	0,55	0,60	0,40	0,45	0,42	0,44	0,36	0,38	0,37	0,30	0,23	0,21
	B1X	0,18	0,4	0,45	0,45	0,28	0,30	0,28	0,28	0,22	0,25	0,25	0,21	0,18	0,14
Ось Z	B1Z	0,25	0,55	0,60	0,40	0,25	0,29	0,28	0,35	0,35	0,36	0,19	0,21	-	-
	B1X	0,18	0,40	0,40	0,30	0,19	0,20	0,21	0,26	0,27	0,30	0,18	0,15	-	-

Следует особенно отметить, что при высоковольтных испытаниях, которые проводились до и после испытаний на стойкость к изменению температуры окружающей среды и вибрационных испытаний, производились измерения частичных разрядов. Измерения ЧР выявляют наличие микронеоднородностей в виде пор и микротрещин недопустимых размеров. Тот факт, что в пределах точности измерений уровень ЧР не изменялся и оставался в пределах нормы < 10 пКл при испытательном напряжении, позволяет утверждать, что отсутствуют микронеоднородности, оказывающие непосредственное влияние на электрическую прочность [6, 7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Славинский А.З. и др. Разработка и постановка на серийное производство высоковольтных вводов с твердой внутренней RIP-изоляцией на классы напряжения 110-220кВ в период 2002-2005 гг. — М.: ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, 2006, № 3.
2. Ли Х., Невилл К. — Справочное руководство по эпоксидным смолам. Пер. с англ. Под ред. Н.В. Александрова. — М.: «Энергия», 1973.
3. Александров Н.В. и др. — Исследование процессов отверждения эпоксидных компаундов. — М.: «Электротехнические материалы», вып. 6, 1971.
4. Фрейдлин А.С., Турусов Р.А. — Свойства и расчет адгезионных соединений. — М.: Химия, 1990.
5. Патент на полезную модель «Остов высоковольтного ввода с RIP-изоляцией», № 57962, 27.10.2006.

6. Галушко А.И., Максимова И.С., Оснач Р.Г. Надежность изоляции электрических машин. — М.: Энергия, 1979.

7. Филиппов А.А., Петерсон А.Л. Изоляторы электрогазовых КРУ. — Л.: Энергоатомиздат, 1988.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При выборе допустимых напряженностей электрического поля и оценке срока службы твердой RIP-изоляции необходимо учитывать взаимосвязь электрических параметров и физико-механических свойств. Надежность твердой изоляции зависит в первую очередь от внутренних механических напряжений, которые возникают в процессе изготовления, и в значительной степени от термомеханических напряжений, меняющихся в процессе эксплуатации.

2. Испытания крупногабаритных конструкций высоковольтных вводов 220 и 500 кВ подтвердили их стойкость к вибрационным нагрузкам, соответствующих землетрясению интенсивностью 9 баллов по шкале MSK-64 и изменениям температуры в диапазоне минус 60 – плюс 100 °С.

3. По расчетным оценкам и результатам проведенных испытаний можно утверждать, что параметры технологических режимов изготовления твердой изоляции обеспечивают необходимый уровень надежности высоковольтных вводов при эксплуатационных нагрузках.