

УДК 699.841: 621.317

О.К. Абрамов, Т.В. Ефремова

ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЬ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ВИБРОУСТОЙЧИВОСТЬ

Обосновывается методика испытаний установленного трансформаторного оборудования на виброустойчивость. Рассмотрены методы измерений и контроля при испытаниях трансформаторов непосредственно на объекте. Обсуждены вопросы виброзащиты трансформаторного оборудования при сейсмических воздействиях.

Ключевые слова: трансформаторное оборудование, сейсмическое воздействие спектр реакции, виброустойчивость, испытания, измерение и контроль, измерительные системы.

1. Введение. Известно, что надежность технологического, электротехнического и любого другого промышленного оборудования зачастую определяется его устойчивостью к внешним механическим воздействиям, которые могут вызывать в конструкциях нежелательные (зачастую необратимые) явления в виде смещений, деформаций, вплоть до потери работоспособности и полного разрушения объекта. Наиболее ответственное и тяжелое оборудование в составе энергообъектов (в частности, открытых распределительных электростанций и подстанций) – силовые трансформаторы. Это оборудование весьма критично к вибрационным нагрузкам, возникающим при сейсмическом воздействии землетрясений [1 – 5].

Следует отметить, что разработка специальных конструкций сейсмостойких трансформаторов требует огромных материальных затрат. По оценкам разработчиков [2], договорная цена на сейсмостойкие трансформаторы увеличивается (как минимум) в 1,75 раза от базовой стоимости трансформатора такой же мощности. К тому же применение специального сейсмостойкого оборудования целесообразно при проектировании и сооружении новых энергообъектов. Более сложной оказывается задача реализации антисейсмических мероприятий для действующего (установленного) оборудования (по некоторым сведениям более 16 % энергосистем РФ функционируют в сейсмически опасных районах).

Целями данной работы являются:

– обоснование методов испытания установленного высоковольтного трансформаторного оборудования на виброустойчивость при сейсмических воздействиях непосредственно на энергообъекте;

– разработка методов измерения и контроля сейсмических сигналов, их спектрального состава и параметров воздействия на грунты, основания и сооружения;

– обоснование сейсмозащитных мероприятий для повышения виброустойчивости установленного трансформаторного оборудования.

2. О наиболее характерных повреждениях силового трансформаторного оборудования. При воздействии сейсмических сил трансформатор совершает колебания как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Анализ повреждений на электрических ПС при землетрясениях, происшедших в различных сейсмических районах, позволяет сделать вывод, что наиболее характерны следующие повреждения силовых трансформаторов [1, 2, 4]: смещения, деформации и повреждения кареток, катков, днища баков, кронштейнов маслорасширителя и т.д.

Особая группа повреждений связана с резонансными колебаниями высоковольтных вводов и других элементов трансформаторов, вызванных вибрационным воздействием при землетрясениях.

Как показали исследования, представленные в работе [5], а также результаты обследований оборудования, поврежденного при землетрясениях [6, 7], процесс разрушения ВВ ввода происходит в следующей последовательности:

– раскрытие зазора между фарфоровой крышкой и фланцем;

– концентрация сил прижатия у фланца;

– превышение предельно допустимых напряжений;

– растрескивание нижней части фарфора (рисунок 1), вплоть до полного разрушения ввода (рисунок 2).

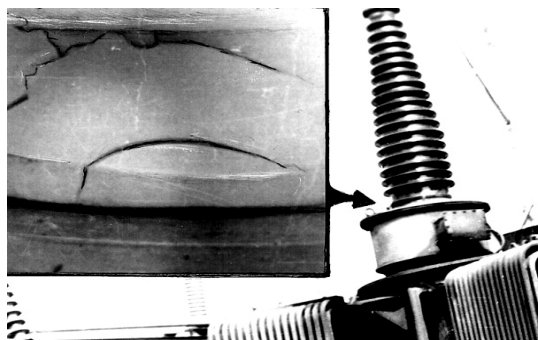


Рисунок 1 – Характер разрушения фарфоровой
покрышки ВВ ввода

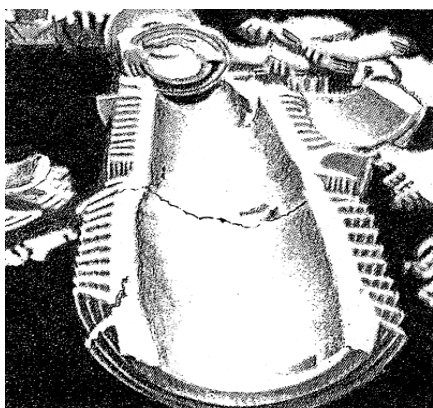


Рисунок 2 – Разрушенная фарфоровая покрышка
ввода трансформаторов класса напряжения
275 кВ на подстанции Сэндай (префектура Мияги,
Япония) во время землетрясения 12.06.1978 г.
($M = 7,4$) [5]

3. Испытания с целью оценки сейсмостойкости установленного оборудования. Наиболее прямым и исчерпывающим способом решения вопроса сейсмостойкости силового трансформаторного оборудования является испытание его прямым воздействием реального землетрясения, максимально вероятным на данной площадке. Однако сильное землетрясение – явление редкое, и получить реальную акселерограмму довольно трудно. Поэтому для реальных испытаний (и расчетов) наиболее часто практикуются следующие методы:

1) конструкция трансформатора (или её модель) подвергается воздействию ускорений, имитирующих реальные землетрясения;

2) конструкция подвергается воздействию слабых землетрясений (которые в данном сейсмическом районе происходят с определенной регулярностью), а затем реакция этих конструкций на такое воздействие *приводится* (перерасчитывается) к землетрясению более высокого класса;

3) методы математического моделирования вероятного сейсмического воздействия на кон-

струкцию с расчетной оценкой реакции этой конструкции на такое воздействие.

У каждого из этих методов присутствуют как отрицательные, так и положительные стороны.

В первом случае акт воздействия на конструкцию может быть неоднократно повторен, а сама конструкция доведена до любого уровня своих прочностных характеристик (вплоть до наступления “предельных состояний”, т. е. разрушения). Однако воспроизвести колебания, равнозначные ускорениям реальных землетрясений, возможно лишь в условиях специализированных лабораторий или полигонов (мощные вибраторы или вибростенды, взрывы и т. д.) [7].

Второй метод в последнее время получает значительное развитие, поскольку позволяет проводить широкомасштабные испытания оборудования (в том числе мощных силовых трансформаторов) непосредственно на площадке подстанции (ПС) как во время его монтажа, так и в процессе его дальнейшей эксплуатации. Привлекательность метода заключается в том, что более слабые землетрясения в данной местности происходят значительно чаще, а локальные особенности грунтов проявляются в полной мере. Реализация этого метода требует постановки на объекте инженерно-сейсмических наблюдений (ИСН) с соответствующей аппаратурой [6].

Расчетные методы применяются на стадии проектирования энергообъектов, а также для получения априорной информации о сейсмо- и виброустойчивости оборудования при организации полигонных (лабораторных) испытаний или при организации инженерно-сейсмических наблюдений на объекте.

В любом случае реакция конструкции на сейсмическое воздействие определяется двумя характеристиками – периодом собственных колебаний T и затуханием ξ . Графическое изображение зависимости реакции конструкции от периода собственных колебаний (или от частоты) представляет собой *спектр реакции* (спектр действия).

Естественно, что кривые спектров действия для каждого вероятного землетрясения на конкретных площадках имеют свои формы (рисунок 3), однако в расчетных методах зачастую используют осредненные кривые некоего “стандартного” землетрясения. Так в работе японских исследователей [5], в качестве “исходного” колебания грунта в месте установки трансформатора принято ускорение равное $0,41 g$. Именно такое значение ускорения грунта явилось критическим для разрушения большинства трансформаторных вводов ВН 220, 275, 500 кВ при земле-

трясении 12.06.78 г. близ побережья Мияги, Япония (см. рисунок 2).

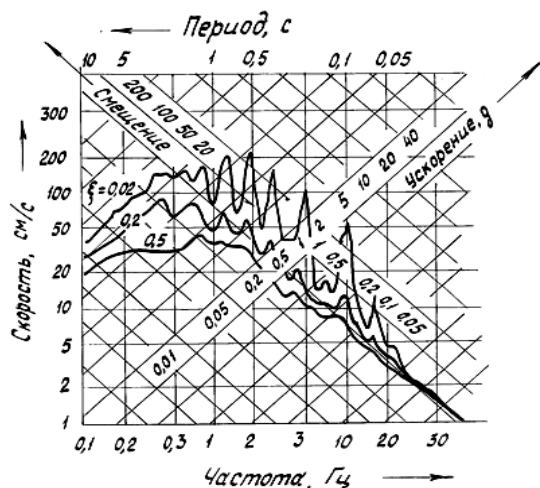


Рисунок 3 – Пример практически рассчитанного спектра реакции вероятного сейсмического воздействия на площадке подстанции 220 кВ в г. Алматы [6]

В результате натурных испытаний конструкций трансформаторов могут быть определены следующие характеристики (статические и динамические): зависимость деформации элементов конструкции от приложенной нагрузки, остаточные деформации, частоты (периоды) собственных колебаний, коэффициенты затухания, жесткость и трещиноватость элементов конструкции, общее влияние статических и динамических нагрузок на прочность конструкции и т.д.

Испытания проводятся в соответствии с ГОСТ 16962.2-90 и ГОСТ 17516. 1-90.

В качестве источников колебаний используются специально разрабатываемые вибрационные машины с вращающимися неуравновешенными массами либо мощные вибраторы с электродинамическим, электромагнитным или гидравлическим принципом возбуждения, аналогичные тем, что применяются в сейсморазведочных работах (рисунок 4).

При использовании в качестве источников возбуждения вибрационных машин с неуравновешенными массами предельная динамическая нагрузка P , прикладываемая к конструкции, не должна превышать максимально допустимые нагрузки в соответствии с ТУ на изделие и в соответствии с ГОСТ 17516- 72, группа М6 по внешним механическим воздействиям при эксплуатации. Величина этой предельной нагрузки определяется из выражения

$$P = 4\pi^2 mr / T^2 = 2\omega^2 mr, \quad (1)$$

где m – масса неуравновешенных грузов;

r – радиус вращения неуравновешенной массы; ω – угловая скорость; T – время полного оборота эксцентрика (неуравновешенной массы).

Такие же нормативы для предельной нагрузки P справедливы и для экспериментов по схеме представленной на рисунке 4, а.

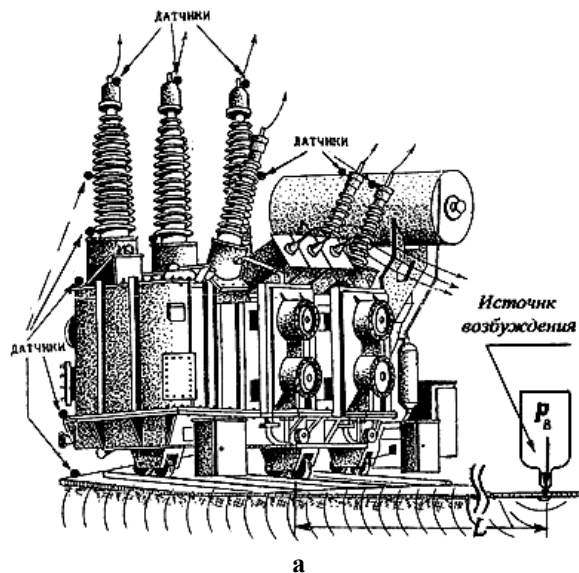


Рисунок 4 – Испытания силового трансформатора на виброустойчивость: а – схема испытаний; б – внешний вид мощного мобильного вибратора LRS – 321 фирмы Western Manufacturing (США)

4. Методы измерений и контроля при организации ИСН. Аппаратурное оснащение ИСН включает в себя специализированные вибро- и сейсмоизмерительные системы (СИС), тензометрические каналы, регистрирующую аппаратуру и соответствующее программно-математическое обеспечение, необходимое для обработки и анализа измерительной информации.

Главной целью организации измерительных экспериментов является получение информации о сейсмическом воздействии на объекты исследования (силовые трансформаторы), о реакции конструкции и отдельных её элементов на заданное сейсмическое воздействие.

В основе такой информации должны быть заложены сведения (или они получены в ходе эксперимента) о динамических параметрах кон-

струкции и (или) их элементов, а также о прочностных характеристиках материалов, используемых в данной конструкции.

4.1. Сейсмоизмерительные каналы. Описание и технические данные различной инженерно-сейсмической аппаратуры можно найти как в специальной литературе [8, 9], так и в наших разработках [6, 10, 11], причем в последних речь идет именно об аппаратуре, используемой в инженерно-сейсмических исследованиях на энергообъектах. Представим некоторые разработки СИС.

Аппаратура регистрирующей восьмиканальной станции подробно описана в работе [6]. В её состав входят: ЧМ-магнитный регистратор, комплект сейсмоприемников, кварцевые часы, блок задержки сейсмических сигналов. Станция работает в ждущем режиме. Для автоматического включения регистратора при землетрясениях (или других сейсмических событиях) предусмотрена система автоматики, которая приводится в действие по сигналу от пускового сейсмометра через пороговое устройство - компаратор. Для обеспечения надежности предусмотрено резервное (буферное) электропитание от аккумуляторной батареи.

Для регистрации собственных колебаний элементов конструкции (например, высоковольтного ввода трансформатора) используется эта же аппаратура, но без блока задержки и в комплекте с соответствующими сейсмоприемниками [11].

На рисунке 5, а приведена функциональная схема 3-канального цифрового сейсмографа.

Сигналы от сейсмометров C поступают непосредственно или через согласующие усилители $У$ на входы коммутатора каналов $КК$. Тактовая частота 256 Гц, поступающая от кварцевых часов $КЧ$, обеспечивает опрос каждого канала 85 раз в секунду. Сигналы с опрашиваемых каналов поступают на вход 12-разрядного $АЦП$, работа которого управляется тактовой частотой от генератора кварцевых часов. 12-разрядные слова поступают на блок промежуточной памяти $БПП$ и одновременно – на автомат включения $АВ$, который в случае сейсмического события выдает команду на перезапись информации из $БПП$ в блок основной памяти $БОП$. В $БОП$ записывается также информация от $КЧ$ об абсолютном времени. Объем памяти $БОП$ позволяет регистрировать сейсмические процессы продолжительностью свыше 256 с.

Частотный диапазон регистрации 0,1 – 20 Гц, динамический диапазон – 72 Дб, потребление энергии – менее 0,15 Вт.

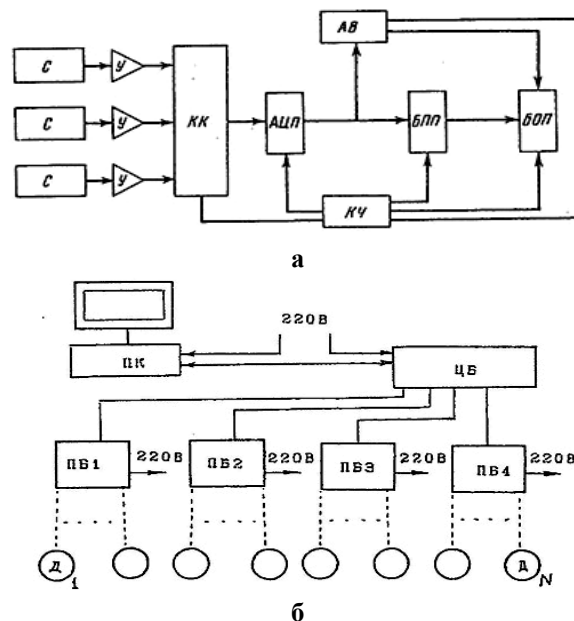


Рисунок 5 – Сейсмоизмерительные комплексы, применявшиеся в инженерно-сейсмических измерениях при испытаниях высоковольтного оборудования: а – функциональная схема цифрового сейсмографа (разработка ИФЗ РАН); б – автоматизированная инженерно-сейсмометрическая станция “Байкал” (разработка СО РАН)

Многоканальная автоматизированная инженерно-сейсмометрическая система (АИС), показанная на рисунке 5, б, может быть использована при испытаниях конструкций аппаратов, зданий и сооружений взрывными, вибрационными, импульсными и др. методами.

АИС состоит из периферийных преобразовательных блоков $ПБ$, с подключенными к ним электромеханическими датчиками ($Д$) и центрального блока $ЦБ$, подключенного к $ПК$ (IBM-совместимого). Станция комплектуется пакетом программ для сбора и обработки регистрируемых сигналов. $ПК$ осуществляет общее управление работой комплекса, текущий контроль за его состоянием, сбор и обработку данных в режиме реального времени, а также их долговременное хранение. Система допускает использование до 64 независимых каналов.

Метрологические показатели сейсмоизмерительных каналов обеспечиваются нормированием передаточных и амплитудно-частотных характеристик. Вопросы нормирования АЧХ и других метрологических параметров сейсмометрических каналов подробно обсуждены в работе [12], а подбору оптимальных (как по габаритным критериям, так и по техническим характеристикам) сейсмометрических каналов посвящена работа [11].

4.2. Тензометрические каналы. Применяются для изучения прочностных характеристик различных элементов конструкций силовых

трансформаторов при воздействии как статических, так и динамических нагрузок.

Особое значение придается испытаниям конструкций трансформаторных вводов высокого напряжения (ВН). Конструкция ввода ВН представляет собой довольно сложное сооружение, состоящее из бакелитового проходного изолятора и защитной фарфоровой крышки, армированной металлическими конструкциями (крепёжные и переходные фланцы, крепления электростатических экранов и т.д.). Внутреннее пространство между фарфоровой крышкой и бакелитовым изолятором заполнено трансформаторным маслом под избыточным давлением. Нарушение герметичности фарфоровой оболочки ввода неизбежно приводит к утечке масла, нарушению изоляционных свойств ввода и к выходу из строя всего трансформатора. Известно, что электротехнический фарфор - весьма хрупкий материал, обладающий коэффициентом запаса прочности $n = \sigma_{пред} / \sigma \leq 2 \div 5$ (особенно при изгибе и кручении), поэтому даже незначительные деформации, возникающие при статических и особенно динамических нагрузках могут привести к растрескиванию глазури, появлению и раскрытию трещин в материале фарфоровой крышки (см. рисунок 1) и в конечном счете - к выходу из строя трансформаторного ввода (рисунок 2).

Одним из наиболее эффективных в настоящее время методов обнаружения центров концентрации механических напряжений в элементах конструкций (в том числе в фарфоровых крышках ВН вводов) является метод малобазной многоканальной тензометрии [13].

Тензометры при измерениях статических и динамических деформаций устанавливают в местах наибольших деформаций и в соседних с ними точках. Среднее в двух точках наибольшее напряжение определяется как

$$\bar{\sigma} = \frac{E}{1 - \mu^2} \left(1 + \mu \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right) \bar{\varepsilon}_1, \quad (2)$$

где $\bar{\varepsilon}_1$ - деформация, замеренная тензометром в направлении главной деформации ε_1 ; E и μ - модуль упругости и коэффициент Пуассона материала; $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$ - отношение средних деформаций на

длине базы тензометра во взаимно перпендикулярных направлениях. В большинстве практических случаев направления главных напряжений неизвестны. В этих случаях для определения σ_1 и σ_2 в зоне напряженного состояния используют равноугольные розетки тензорезисторов ("дельта" - розетка) и применяют выражение

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1 - \mu} \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{3} \pm \frac{E}{1 + \mu} \times \sqrt{\left(\varepsilon_1 - \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{3} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\sqrt{3}} \right)^2}. \quad (3)$$

5. Вопросы сейсмозащиты трансформаторного оборудования. По результатам испытаний могут быть приняты технически обоснованные решения, которые позволят реализовать вибростойкие (сейсмоустойчивые) конструкции трансформаторного оборудования, либо осуществить антисейсмическую реконструкцию действующего (установленного) оборудования [2, 4, 5].

Для большинства практических целей общая задача виброзащиты может быть сведена к рассмотрению нескольких упрощенных задач с достаточной степенью приближения к заданной эффективности защиты [14].

5.1. Задача расчета реакции нелинейных амортизированных систем на случайные кратковременные воздействия (рисунок 6). Рассмотрим задачу о воздействии внезапно возникшего в момент времени t_0 ускорения $W = const$ на инертную массу M , закрепленную с помощью линейной (или нелинейной) упругой связи C (рисунок 6, а). Основание B с жестко соединенной с ним рамой A совершает колебания (например, возникшие при землетрясении).

Уравнение колебаний такой системы имеет вид

$$\ddot{Y} = \omega_o^2 Y + \gamma Y^3 = -W, \quad (4)$$

где: Y - смещение массы относительно рамы;

$\omega_o = \sqrt{\frac{K}{M}}$ - круговая частота собственных колебаний системы;

$\gamma = \frac{C}{M}$ - коэффициент упругой нелинейности;

C - жесткость связи (пружины); W - ускорение основания (и рамы).

Интегрируя уравнение (4) при начальных условиях $t = 0; Y = 0; \dot{Y} = 0$, получаем соотношение

$$\frac{\dot{Y}^2}{2} + \frac{\omega_o^2 Y^2}{2} + \frac{\gamma Y^4}{4} + WY = 0. \quad (5)$$

Если выразить время в функции перемещения, то (с учетом знака скорости) можно записать следующее интегральное соотношение:

$$t(Y) = - \int_0^Y \frac{dY}{\sqrt{P(Y)}} = - \int_0^Y \frac{dY}{\sqrt{-\omega_o^2 Y^2 - \frac{\gamma Y^4}{2} - 2WY}}.$$

Предположив, что один из корней полинома $P(Y)$ окажется равным нулю (т. е. $Y_1 = 0$) и произведя преобразование этого интегрального соотношения в эллиптическом виде, получим выражение, определяющее период колебаний T нашей системы:

$$T = \frac{2}{\sqrt{H}} \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}} = \frac{2K(k, \pi/2)}{\sqrt{H}}, \quad (6)$$

где $K(k, \pi/2)$ – полный эллиптический интеграл; k – модуль эллиптического интеграла, определяемый из соотношения $k^2 = \frac{1}{2} - \frac{3l_2}{4H}$;

l_2 – вещественный корень полинома $P(Y)$;

$$H = \frac{\omega_0^2}{4}.$$

Через четверть периода $t = \frac{T}{4} = \frac{K}{2\sqrt{H}}$

смещение массы M можно определить из выражения

$$Y = -\frac{6W}{12(l_2 + H) + \omega_0^2}, \quad (7)$$

а максимальное (по модулю) смещение имеет место при $t = \frac{K}{\sqrt{H}}$ и составляет:

$$Y_{\max} = -\frac{6W}{12l_2 + \omega_0^2}. \quad (8)$$

Формулы (6) и (7) в общем виде описывают нелинейные колебания амортизированной массы M .

В частном случае (при $\gamma = 0$ и $k = 0$) получаем линейный амортизатор:

$$\left. \begin{aligned} Y &= -\frac{W}{\omega_0^2}(1 - \cos \omega_0 t) \\ Y_{\max} &= -\frac{2W}{\omega_0^2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

На рисунке 6, б представлены временные графики формы колебаний для амортизаторов с линейной и нелинейной упругостью. Видно, что для систем с нелинейно-упругой характеристикой период колебаний и смещение Y_{\max} оказываются меньшими, чем для систем с линейной амортизацией.

Коэффициент передачи ускорения определяется соотношением

$$K_{\ddot{Y}} = \frac{\ddot{Y}}{W} = -\frac{\omega_0^2 - \gamma Y^3}{W}, \quad (10)$$

причем для нелинейной системы

$$K_{\ddot{Y}_{\max}} = \frac{\ddot{Y}}{W} = 3,56;$$

для линейной системы

$$K_{\ddot{Y}_{\max}} = \frac{\ddot{Y}}{W} = 2.$$

Из этого можно сделать вывод, что упругое закрепление объекта M с помощью как линейной, так и нелинейной амортизации не обеспечивает в достаточной мере защиту от ускорений, передаваемых от движущегося основания.

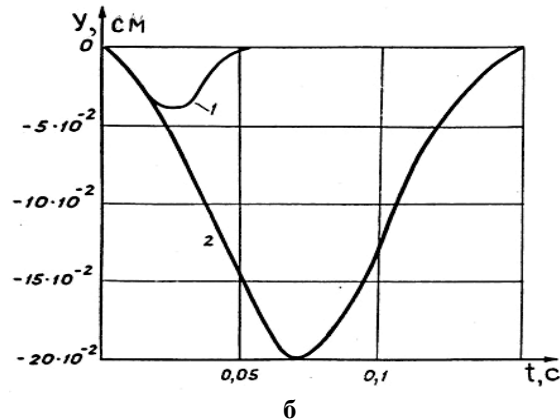
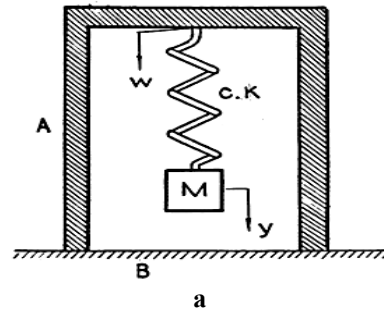


Рисунок 6 – К решению задачи об амортизированной системе: а – расчетная схема; б – форма колебаний при случайном ускорении: 1 – с нелинейным амортизатором; 2 – с линейным амортизатором

5.2. Задача о колебаниях системы с амортизатором, снабженным упругими ограничителями хода (рисунок 7). Рассмотрим колебания системы с амортизатором, снабженным упругими ограничителями хода, которые вступают в действие при чрезмерном увеличении деформации основного упругого элемента (рисунок 7, а).

Характеристика такой системы показана на рисунке 7, б, а её фазовое отображение – на рисунке 7, в. На этом же рисунке для сравнения приведены фазовые характеристики системы без ограничителей (кривая 2).

Дифференциальные уравнения, описывающие колебания амортизированного объекта с массой M при воздействии ускорения в форме скачка ($W = 0$ при $t < 0$ и $W = const$ при $t > 0$), имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{Y}_1 + \omega_1^2 Y_1 &= -W \text{ и } \delta \delta \text{ } |Y| < a \\ \ddot{Y}_3 + \omega^2 Y_3 &= (\omega^2 - \omega_1^2)a - W \text{ и } \delta \delta \text{ } Y > a \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где $\omega_1^2 = \frac{k_1}{M}$; $\omega^2 = \frac{k_1 - k_2}{M}$; k_1, k_2 – жесткости основного упругого элемента и ограничителя хода соответственно.

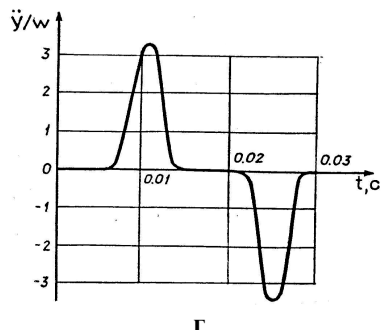
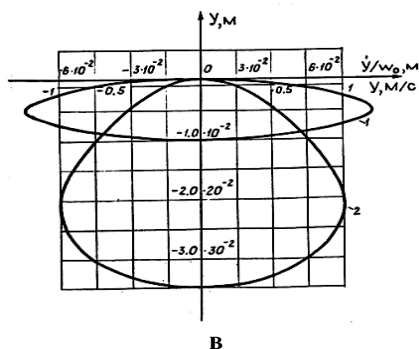
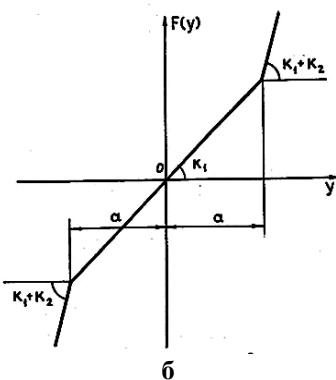
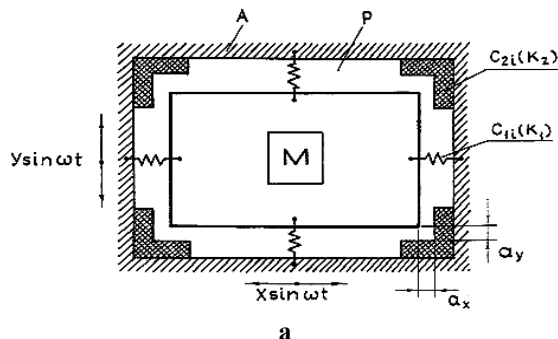


Рисунок 7 – Амортизированная система с упругими ограничителями хода: а – расчетная схема; б – характеристика системы; в – фазовые портреты амортизированных систем: 1 – нелинейная система с ограничителями; 2 – система без ограничителей; г – зависимость ускорения от времени воздействия

Интегрированием уравнений (11) находим:

$$\dot{Y}_1(-a) = \sqrt{-\omega_1^2 a^2 + 2Wa}; \quad (12)$$

$$Y_2 = -\sqrt{h - \omega^2 Y_2^2 - 2[(\omega^2 - \omega_1^2)a + W]Y_2}, \quad (13)$$

где $h = \dot{Y}_1 a^2 + \omega^2 a^2 - 2[(\omega^2 - \omega_1^2)a + W]a$.

Фазовые характеристики (рисунок 7, в) построены на основе уравнений (11)–(13) при следующих значениях параметров системы:

$\omega_1^2 = 1936 \text{ с}^{-2}$; $\omega_2 = 199000 \text{ с}^{-2}$; $W = 196,2 \text{ м} / \text{с}^2$; $a = 0,005 \text{ м}$. При приложении ускорения система совершает несимметричные относительно оси времени колебания с наибольшим смещением $Y_{\max} = -0,00925 \text{ м}$ [14].

График изменения ускорений от времени приведен на рисунке 7, г. При кратковременном ускоренном движении основания амортизированный объект практически никаких ускорений испытывать не будет. Но при увеличении времени воздействия коэффициент передачи резко возрастает и имеет вид, показанный на рисунке 7, г.

5.3. Задача о работе системы в режиме динамического гасителя (рисунок 8). Известно, что вынужденные колебания системы, состоящей из амортизированной массы M и основания, под действием возмущающей силы являются крайне нежелательными, а зачастую просто недопустимыми, особенно, если частота системы совпадает с частотой этой возмущающей силы, – случай резонанса. Для того чтобы вывести систему из резонанса, целесообразно применение динамических виброгасителей. Такой гаситель эффективен при постоянстве частоты ω возмущающей силы; в противном случае он может оказаться даже вредным, так как уже при сравнительно незначительном изменении $\Delta\omega$ система может попасть в резонансные режимы, связанные с собственными частотами как основной, так и дополнительной массы. Устранить такой недостаток гасителя можно либо увеличением массы виброгасителя M_2 , что позволяет “раздвинуть” резонансные пики ω_1 и ω_2 , либо введением в систему динамического гасителя эффективного демпфирования (затухания).

На рисунке 8, а изображены амплитудные характеристики амортизированной системы, к которой присоединены гасители.

Кривая 1 соответствует случаю действия виброгасителя без затухания ($\zeta = 0$). Суммарная масса имеет две резонансные частоты (ω_1 и ω_2), при которых амплитуды колебаний бесконечно велики. Кривая 2 соответствует случаю жесткой связи массы гасителя M_2 с основной массой M_1 . Кривая 3 отражает случай динамического виброгасителя с затуханием ($\zeta = 0,1$). Из рисунка 8, а

видно, что все три характеристики проходят через точки *A* и *B*, называемые *точками оптимальной настройки* гасителя.

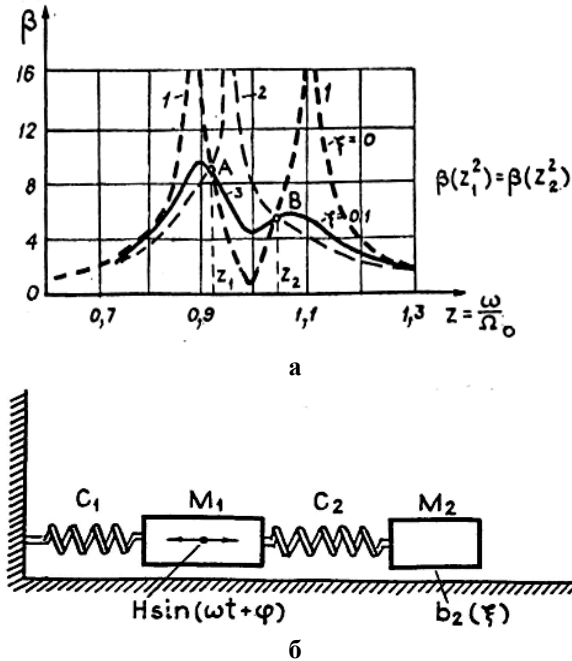


Рисунок 8 – Система виброзащиты с динамическим виброгасителем колебаний:
а – амплитудно-частотные характеристики системы; б – расчетная модель

Полная схема системы с динамическим гасителем показана на рисунке 8, б. Массы M_1 и M_2 соединены между собой и основанием пружинами с жесткостью C_1 и C_2 соответственно. В качестве демпфирующей силы может служить трение $b_2(\xi)$.

Условия оптимальной настройки виброгасителя наступают при

$$f = \frac{1}{1+\nu} = \frac{\omega_0}{\Omega_0} \text{ и } \beta = \sqrt{1 + \frac{2}{\nu}}. \quad (14)$$

Это означает, что при $\omega \neq const$ и при наличии затухания $\xi = \frac{b_2}{2M\Omega_0}$ гаситель колебаний должен быть настроен на частоту $\omega_0 < \Omega_0$, причем это смещение частоты ω_0 тем больше, чем больше ν .

Теперь задача настройки гасителя сводится к тому, чтобы введением оптимального затухания величина коэффициента динамичности β (Z) не превышала значения (14), что соответствует кривой 3 на рисунке 8, а.

Для практических целей оптимальное затухание ξ при выбранном $\nu = M_2 / M_1$ целесообразно находить из экспериментального выражения

$$\xi^2 = \frac{3\nu}{8(1+\nu)^3}. \quad (15)$$

В системе виброзащиты тяжелого трансформаторного оборудования роль динамических гасителей могут исполнять установочные и вспомогательные конструкции, например бетонные фундаментные плиты, соединенные с объектом (трансформатором) и с основанием (грунтом) посредством упругих связей с заданной жесткостью.

6. Заключение. Решение проблемы надежности технологического, электротехнического и любого другого промышленного оборудования в условиях внешних вибрационных, сейсмических и других механических воздействий содержит комплекс теоретических, научно-исследовательских и технических мероприятий, в том числе:

1) инженерно-сейсмические исследования на площадках энергообъектов (например, распрестройства электрических станций или подстанций) с целью определения параметров наиболее вероятного сейсмического воздействия на установленное оборудование (в частности, силовые трансформаторы);

2) натурные испытания оборудования (в частности, трансформаторов) с целью определения реакции конструкций на заданное воздействие. В качестве источников вибро-сейсмического возбуждения могут применяться как естественные (записи землетрясений), так и искусственные (вибраторы) источники;

3) по результатам испытаний принимаются технически обоснованные вибро-сейсмозащитные мероприятия с целью повышения эксплуатационной надежности трансформаторного и прочего энергооборудования в условиях реальных сейсмических и других механических воздействий, причем задача виброзащиты с определенной степенью эффективности сводится к решению упрощенных задач (или комплекса таковых).

Библиографический список

1. *Бородай И.А., Покровский В.И.* Состояние электротехнического оборудования энергообъектов Армении при землетрясении 1988 г. // Экспресс-информация, серия “Сейсмостойкое строительство”, вып. № 12. М.: ВНИИТПИ, 1991. – С. 2–24.

2. *Мелешко И.Ю., Покровский В.И., Бородай И.А.* Трансформаторное оборудование в условиях сейсмических воздействий // Инф. сборник “Электротехническое производство, научно-технические достижения и передовой опыт”. № 1. М.: ВНИИТПИ, 1991. – С. 9–12.

3. *Абрамов О.К.* Измерение и контроль динамических характеристик технологических сооружений при сочетании нагрузок // Вестник РГРТУ. Вып. 19, 2006. – С. 72–83.

4. *Новоа Ф.* Землетрясения и технические требования к оборудованию распределительных устройств и его установке // Кн. Подстанции переменного тока. СИГРЭ-82. – М.: Энергия, 1972. – С. 71–95.

5. *Мячи, Кавада, Шиоми и др.* Анализ сейсмостойкости вводов трансформаторов // Сб. Переводы докладов по большим электрическим системам (СИГРЭ 84). – М.: Энергоатомиздат, 1986. – С. 72–83.

6. *Абрамов О.К.* Инженерно-сейсмические исследования на электрических подстанциях. – Душанбе: НПИЦентр, 1994. – 34 с.

7. *Абрамов О.К., Калашикова Т.М., Романов О.А.* Методика оценки сейсмостойкости оборудования открытых распредустройств электрических подстанций. Душанбе. – Дониш, 1997. – 68 с.

8. Инженерно-сейсмометрическая служба СССР/ ред. Э.Е. Хачиян. – М.: Наука, 1987. – 96 с.

9. Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР. – М.: Наука, 1974. – 244 с.

10. *Ульянов В.И., Абрамов О.К., Мельников А.Ю.* Схемотехника гибридных микроэлектронных уст-

ройств для сейсмической телеметрии // Сб. научн. тр. Автоматизация измерений и испытаний. – Рязань: РГРТА, 1999. – С. 81–87.

11. *Абрамов О.К., Мельников А.Ю., Семенчиков В.Д.* Перспективные датчики для инженерной сейсмометрии на энергообъектах // Экспресс-информация / Серия: Инженерная сейсмометрия. Вып.4. НПИЦентр, 1994. – 22 с.

12. *Абрамов О.К.* Нормирование метрологических характеристик и показателей надежности сейсмоизмерительной аппаратуры и геофизических измерительных сетей // Вестник РГРТА. Вып. 16, 2005. – С. 57–62.

13. *Пригоровский Н.И.* Методы и средства определения полей деформаций и напряжений: справочник. – М.: Машиностроение, 1983. – 248 с.

14. Динамический расчет зданий и сооружений: справочник проектировщика. – М.: Стройиздат, 1984. – 303 с.