

УДК 621.316.37.064.1

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ УПРУГО-ВЯЗКОГО ДЕМПФИРОВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ КЗ**

**ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF ELASTIC-VISCOUS DAMPING PARAMETERS ON THE MECHANICAL STRENGTH OF ELECTRICAL DEVICES AT SHORT CIRCUIT**

Р.С. Борисюк

Научный руководитель – Я.В. Потачиц, к.т.н.

Белорусский национальный технический университет

г. Минск, Республика Беларусь

romioborisuk@mail.ru

R. Borisyuk

Supervisor – Ya. Potachits, Candidate of Technical Sciences

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в статье рассмотрена тема поиска оптимальных параметров демпфирующего устройства для уменьшения влияния динамического воздействия токов короткого замыкания на типовые аппараты подстанций типовых открытых распределительных устройств, а также предложен метод нахождения динамического воздействия для сравнения с паспортными данными.*

***Abstract:** the article discusses the topic of searching for optimal parameters of a damping device to reduce the influence of the dynamic effect of short-circuit currents on typical substation devices of typical open switchgear, and also proposes a method for finding the dynamic effect for comparison with passport data.*

***Ключевые слова:** устройство демпфирования, вязкое демпфирование, частота колебаний, резонанс, гармоника, динамическое воздействие.*

***Keywords:** damping device, viscous damping, oscillation frequency, resonance, harmonic, dynamic effect.*

### **Введение**

Как отмечалось в [1] особый научный интерес представляет создание таких условий работы подстанционных аппаратов типовых открытых распределительных устройств (ОРУ), при которых энергия вынужденных колебаний будет поглощаться конструктивным элементом, установленным между местом глухой заделки и точкой крепления самого аппарата. В качестве конструктивного элемента, определяющего быстрое затухание собственных колебаний аппаратов в [1] было выбрано демпфирующее устройство, обладающее как упругими  $R$ , так и вязкостными  $C$  характеристиками.

### **Основная часть**

В общем случае решение практических задач о возможности гашения колебаний предполагает наличие сведений о прочностных и демпфирующих свойствах материалов, которые можно получить только в результате натурного эксперимента. Одним из наиболее известных методов для получения характеристик демпфирования является метод резонансной кривой [2]. Данный метод основан на получении экспериментальной амплитудно-частотной характери-

стики – зависимости амплитуды  $X$  перемещения установившихся колебаний от частоты  $\omega$  гармонического возбуждения [2]. Демпфирующие свойства системы оценивают по ширине пика или впадины. С помощью данной характеристики, можно оценить энергию демпфирования – энергию, поглощенную за один цикл колебаний, отнесенную к единице объема.

Однако, как отмечалось выше, проектирование аппаратов с учетом демпфирующих элементов задача непростая и требует проведения большого количества натуральных экспериментов. В рамках данной работы будет предложен метод численного моделирования демпфирующих свойств материалов.

Для проведения наиболее качественного численного эксперимента необходимо рационально выбрать параметры демпфирования. Для этого необходимо обратиться к теории упругости.

В данном случае в колебательной системе принято демпфирование по Рэлею [3], т.е. оно является пропорциональным соответствующей компоненте скорости движения и определяется выражением:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K], \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности массы,  $c^{-1}$ ;

$\beta$  – коэффициент пропорциональности жёсткости,  $c$ .

После преобразования степень демпфирования по  $i$ -ой моде можно представить как [4]:

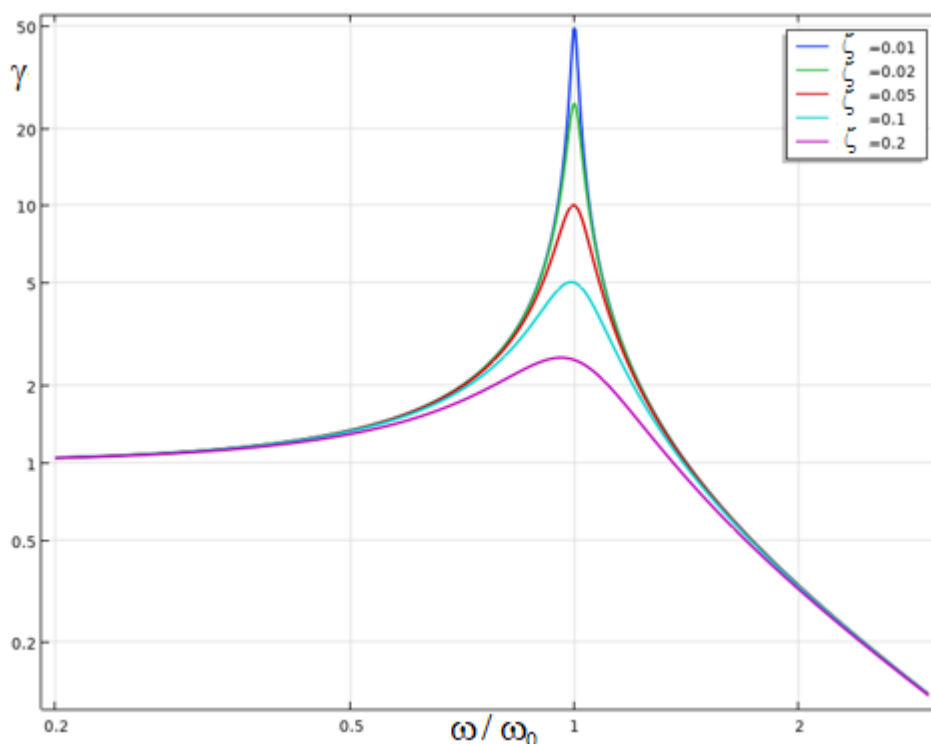
$$\zeta_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2}, \quad (2)$$

Из уравнения (2) следует, что степень демпфирования пропорциональна частоте системы. Для некоторого  $y = \frac{\alpha}{2\omega} + \frac{\beta\omega}{2}$ , когда  $\omega$  – относительно невелико, первое слагаемое  $\frac{\alpha}{2\omega}$  – имеет преобладающий характер на начальном этапе и по мере возрастания  $\omega$  уменьшается и асимптотически приближается к нулю, а слагаемое  $\frac{\beta\omega}{2}$  – возрастает. Другими словами, если речь идёт об очень гибкой системе (гибкие опоры, высокие конструктивные элементы) и имеет небольшие низшие частоты, то она будет показывать нелинейные свойства демпфирования и будет меняться к линейным по мере возрастания собственных частот. Однако, большинство конструкций обычно проектируются так, чтобы иметь достаточную жесткость, и, соответственно, имеют значительно более высокие низшие частоты, а слагаемое будет доминирующим. Более того, принимая тот факт, что нелинейный фактор будет слишком мал, то для стандартных конструкций не будет ошибочным предположить, что степень демпфирования каждой моды линейно зависит от частоты системы. Для системы, которая имеет большое количество степеней свободы, только первые несколько частот соответствуют значительному динамическому влиянию.

Характер колебательного процесса в зависимости от значения степени демпфирования можно разделить на три случая [5]:

1.  $\zeta < 1$  – колебательное движение;
2.  $\zeta = 1$  – движение при критическом демпфировании;
3.  $\zeta > 1$  – не колебательное движение.

Первый случай называется подкритическим демпфированием, когда значение степени демпфирования лежит в интервале ( $0 < \zeta < 1$ ) и такое решение является наиболее подходящим для описания демпфирования колебаний в механических системах. На рисунке 1 показан характер изменения колебательно-го процесса с различными значениями степени демпфирования, которые характерны именно для выбранной нами модели консольного стержня и демпфирующего устройства, связанного непосредственно с ним [6].



$\gamma$  – коэффициент усиления амплитуд;  $\omega$ ,  $\omega_0$  – частоты вынужденных и собственных колебаний системы соответственно

Рисунок 1 – Влияние степени демпфирования на усиление амплитуд колебаний при резонансных частотах

Из рисунка 1 видно что, когда отношение указанных частот близко к единице, тогда демпфирование оказывает существенное влияние на коэффициент усиления. При малой степени демпфирования наибольшее влияние демпфирования наблюдается вблизи резонансных частот. Для выбранной нами модели и с учетом материалов используемых при изготовлении основных конструктивных элементов ОРУ целесообразно задаться диапазоном степени демпфирования, находящимся в интервале от 0,05 до 0,2.

В соответствии с модальным анализом вынужденных и собственных колебаний основных конструктивных элементов были выявлены случаи наступле-

ния резонанса при совпадении частот вынужденных колебаний и собственных частот колебаний, в частности для выключателя ВГТ-110 резонанс наступает для 11 гармоники собственных колебаний аппарата [4].

Исходя из предположения, что рассматриваемая колебательная система имеет две степени свободы и что степень демпфирования каждой моды линейно зависит от частоты колебаний системы, были найдены значения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  для резонансных и предшествующих частот для выключателя ВГТ-110. При этом степени демпфирования пошагово принимались равными  $\zeta_1 = 0,05$ ;  $\zeta_2 = 0,1$ ;  $\zeta_3 = 0,15$ ;  $\zeta_4 = 0,2$  [4].

Результаты расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения коэффициентов и при различных значениях степени демпфирования для выключателя марки ВГТ-110

Значение степени демпфирования $\zeta$	Значение коэффициента $\alpha$ , $c^{-1}$	Значение коэффициента $\beta$ , с
0,05	0,5489	0,0045
0,1	1,0977	0,0090
0,15	1,6466	0,0135
0,2	2,1958	0,018

Для рассматриваемых нами типов электрических аппаратов можно рассчитать наиболее оптимальные значения коэффициента демпфирования элемента, на котором они будут установлены согласно формуле, которая приведена в [1]:

$$C_d = 2\zeta\omega_n m; \tag{3}$$

где  $\omega_n$  – резонансная частота собственных колебаний;

$m$  – масса стержня;

$\zeta$  – степень демпфирования.

Представим результаты расчета для всех выключателя ВГТ-110 с различным значением  $\zeta$  в виде таблицы 2.

Таблица 2 – Значения коэффициента при различных значениях степени демпфирования для выключателя марки ВГТ-110

Значение степени демпфирования $\zeta$	Значение резонансной частоты собственных колебаний $\omega_n$ , рад/с	Масса аппарата $m$ , кг	Значение коэффициента демпфирования $C_d$ , т·с/м
0,05	76,4778	530	4,0533
0,1	76,4778	530	8,1066
0,15	76,4778	530	12,1599
0,2	76,4778	530	16,2133

Для выключателя ВГТ-110 был произведён расчёт значений собственных частот колебаний при воздействии внешней возмущающей динамической нагрузки, полученной в [4] и различных степенях демпфирования.

Для оценки влияния параметра степени демпфирования  $\zeta$  расчетные значения частот собственных колебаний выключателя ВГТ-110 представим в виде графической зависимости. Как видно из графика, показанного на рисунке 2, с увеличением параметра  $\zeta$  наблюдается снижение частот собственных колебаний электрических аппаратов.

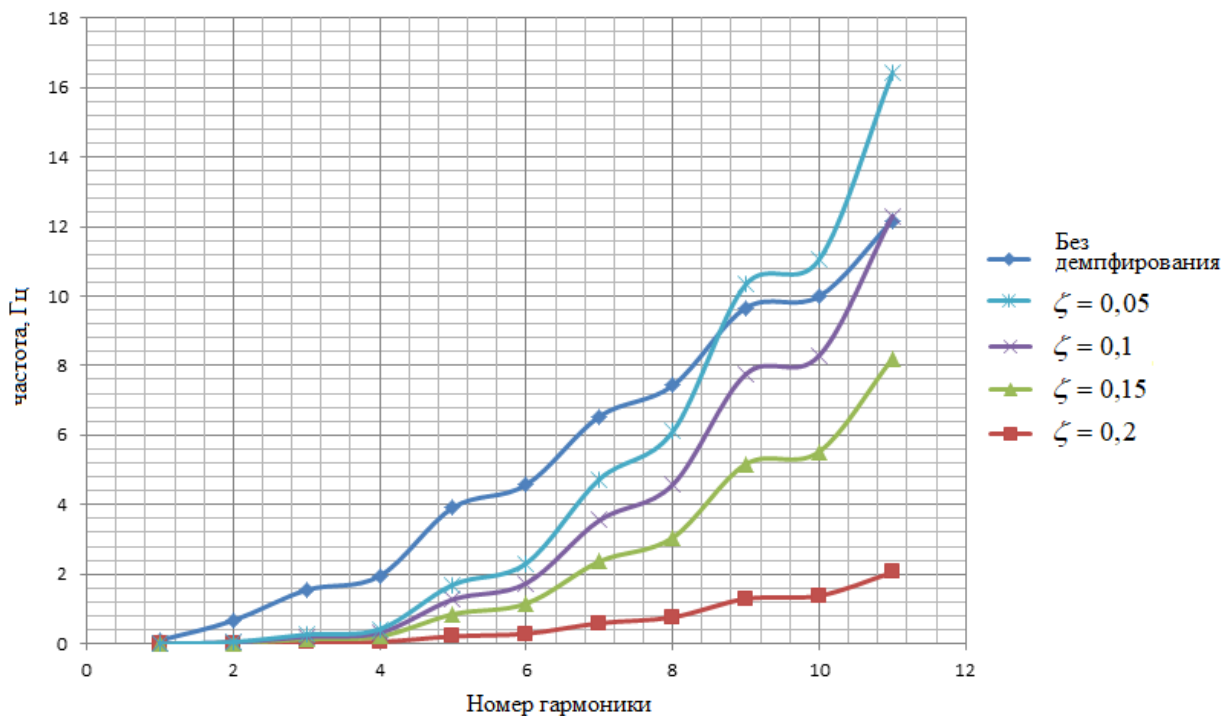


Рисунок 2 – Зависимость частоты собственных колебаний от различной степени демпфирования для выключателя ВГТ-110

В ряде расчетных случаев с учётом демпфирования собственная частота колебаний аппаратов не уменьшается, а возрастает. Это можно объяснить тем, что установка устройства демпфирования под электрический аппарат изменяет общую жёсткость рассматриваемой единой колебательной системы, что и влечёт за собой некоторое возрастание частот собственных колебаний, особенно при относительно низком значении параметра степени демпфирования  $\zeta = 0,05$ .

Анализ полученных в результате вычислительного эксперимента данных позволяет сделать вывод о том, что установка специального демпфирующего элемента у основания аппарата приводит к увеличению его податливости, более эффективному поглощению энергии при вынужденных колебаниях и снижению собственных частот при соответствующем выборе параметра степени демпфирования. Другими словами, при установке демпфера резко снижается вероятность наступления резонанса и как следствие риск возникновения разрушающих механических нагрузок в материале корпуса аппарата.

Значения механических нагрузок на основные аппараты можно определить с помощью выражения приведенного в [1]:

$$G_{\text{дин}} = G_{\text{ст}} + \mu P_0, \tag{4}$$

где  $P_0$  – амплитуда колебаний резонансной частоты;

$G_{ст}$  – статическое нагружение;  
 $\mu$  – динамический коэффициент.

На основании результатов вычисленных значений частот собственных и вынужденных колебаний с учётом демпфирования, определим для выключателя ВГТ-110 значение динамических нагрузок, которое будет равно 158 даН [4]. Полученные результаты динамических усилий при условии демпфирования не превышают соответствующие значения их минимальных разрушающих нагрузок на изгиб в соответствии с паспортными данными, равными 230 даН, следовательно, отсутствует риск нарушения их нормальной работы.

### **Заключение**

Проведен вычислительный эксперимент по оценке влияния параметров упруго-вязкого демпфирования на характер колебательного процесса электрических аппаратов, представленных консольным стержнем и определены наиболее эффективные значения параметров коэффициента и степени демпфирования, определены значения динамических нагрузок на основные конструктивные элементы типового ОРУ 110 кВ, сопоставлены с паспортными данным, в соответствии с которыми усилия не превышают допустимые значения.

### **Литература**

1. Борисюк, Р. С. Совершенствование методики определения динамических нагрузок на аппараты типовых ОРУ / Р. С. Борисюк ; науч. рук. Я. В. Потачиц // Современные тенденции в развитии экономики энергетики : сборник материалов IV Международной научно-практической конференции, 1 декабря 2023 г. / редкол.: Е. Г. Пономаренко (пред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2023. – С. 130-131.
2. Матвеев, Д. В. Резонансный метод определения частоты / Д. В. Матвеев, А. И. Смирнов, К. Ф. Латыпов. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2016. – № 3 (107). – С. 145-148.
3. Демпфирование по Рэлею в ПК ЛИРА-САПР. – Электронный ресурс. – Режим доступа: <https://help.liraland.ru/984/3158/>. Дата доступа: (13.08.2023).
4. Расчет гибких проводников электроустановок в условиях воздействия статических и электродинамических нагрузок: отчет о НИР (заключит.) / БНТУ; рук. Е.Г. Пономаренко; исполн.: П.И. Климкович, Ю.В. Бладыко, С.В. Сизиков, Я.В. Потачиц, С.В. Лозицкая, А.Н. Мешкова. – Минск, 2023. – 144 с.
5. Шакирзянов, Р. А. Динамика и устойчивость сооружений : учеб. пособие / Р. А. Шакирзянов, Ф. Р. Шакирзянов. – 2-е перераб. изд. – Казань : Изд-во Казанск. гос. архитект.-строит. ун-та, 2015. – 120 с.
6. Вибрации в технике: Справочник. В 6 т. Т. 6. Защита от вибрации и ударов / Под ред. К.В. Фролова. 2-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 1995. – 456 с.