

УДК 534.1:539.3

*Н. Г. ГАРМАШ*, канд. техн. наук; с.н.с. ИПМаш НАН України, Харьков

### **ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВАЛОПРОВОДОВ ТУРБИН ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ**

Проведены исследования напряженного состояния в наиболее опасных сечениях роторов валопроводов при крутильных колебаниях, вызванных внезапными нагружениями ротора генератора. Рассматривались двухфазные и трехфазные короткие замыкания с различной продолжительностью действия электромагнитных моментов. Расчеты проводились с помощью программного комплекса, созданного на основе метода конечных элементов (МКЭ) с использованием стержневых расчетных моделей.

**Ключевые слова:** валопровод, турбоагрегат, крутильные колебания, короткое замыкание, повреждаемость.

**Введение.** Одной из важных проблем современного турбостроения является обеспечение механической прочности элементов турбоагрегата при его работе на различных режимах. Опыт длительной эксплуатации турбомашин ТЭС и АЭС показывает, что одной из основных причин поломок, аварийных остановов и разрушений роторов турбин является накопление усталостной повреждаемости вследствие интенсивных крутильных колебаний валопровода [1], которые чаще всего вызваны воздействиями со стороны генератора.

Динамическая нагрузка на валопровод турбины возникает в основном при нештатных режимах работы генератора: коротких замыканиях (КЗ), включении в сеть с грубой синхронизацией, быстром повторном включении и других. При внезапном коротком замыкании возникает электромагнитный крутящий момент, действующий на ротор генератора и вызывающий интенсивные крутильные колебания валопровода [2, 3], которые становятся причиной возникновения высокого уровня напряжений в различных сечениях роторов.

Исследования влияния крутильных колебаний валопроводов, которые возникают при нештатных режимах работы генератора, на прочность роторов паровых турбин представлены в работах [4, 5]. Оценка усталостной поврежденности вследствие значительного уровня напряжений при крутильных колебаниях проводилась численно с помощью упрощенных дискретных моделей валопровода. Рассматривались различные формы всплеска крутящего момента и их влияние на степень повреждаемости материала валопровода. В публикациях [4–6] отмечается, что при длительной эксплуатации возможны накопления усталостного повреждения вала турбины вследствие значительного уровня напряжений, вызванных крутильными колебаниями, что может привести к разрушениям турбоагрегата. Поэтому исследование напряженного состояния в различных сечениях валопроводов турбин при крутильных колебаниях, вызванных короткими замыканиями, является актуальным.

**Постановка задачи.** Рассматривается влияние нештатных режимов работы генератора, вызванных двухфазными и трехфазными короткими замыканиями, на крутильные колебания валопроводов турбоагрегатов К-220-44-2М и К-325-23,5 и на уровень касательных напряжений в наиболее опасных их сечениях. Участки валопровода моделируются в виде стержней кусочно-постоянного поперечного сечения с распределенной массой, а диски роторов и фланцы – сосредоточенными массами и

© Н.Г. Гармаш, 2015

моментами инерции. При построении расчетных схем (рис. 1) учитывались все конструктивные особенности рассматриваемых турбоагрегатов. Для валопровода турбоагрегата К-220-44-2М (рис. 1а) расчетная модель состояла из 156 стержневых участков и 29 сосредоточенных масс, для турбоагрегата К-325-23,5 (рис. 1б) – из 162 участков и 38 масс.

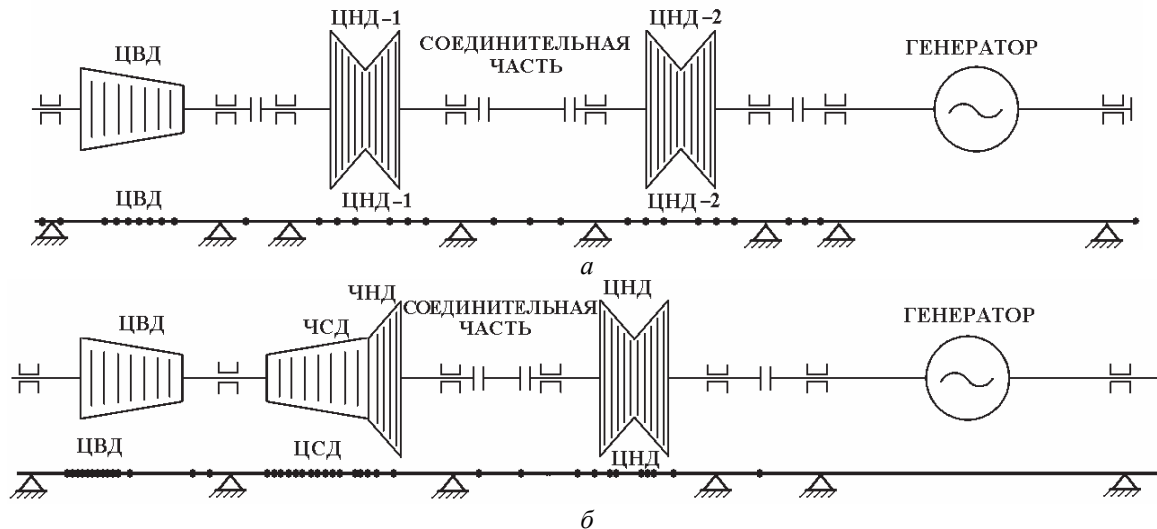


Рис. 1 – Схемы валопроводов турбоагрегатов:  
а – схема турбоагрегата К-220-44-2М; б – схема турбоагрегата К-325-23,5

Для описания изменения во времени электромагнитного момента  $M_{кз}$  используются зависимости, предложенные в нормативном документе [3] и имеющие в общем случае вид

$$M_{кз} = M_n \sum_{i=1}^3 (a_{0i} e^{-b_{0i}t} + a_{1i} e^{-b_{1i}t} \sin \omega t + a_{2i} e^{-b_{2i}t} \sin 2\omega t), \quad (1)$$

где  $M_n$  – номинальный крутящий момент;  $\omega$  – частота вращения ротора;  $a_{0i}, a_{1i}, a_{2i}, b_{0i}, b_{1i}, b_{2i}$  – коэффициенты, зависящие от вида короткого замыкания и типа генератора.

**Результаты исследований.** Для решения задач вынужденных колебаний и переходных процессов в валопроводах на упруго-демпферных опорах создано программное обеспечение, использующее МКЭ и позволяющее проводить расчеты путем непосредственного интегрирования уравнений движения методом Ньюмарка. Ротор моделируется стержневой системой, учитывающей особенности конструкции и состоящей из участков различного поперечного сечения и материала. При решении задач учитываются продольные, изгибные и крутильные деформации, а также деформации сдвига и инерция поворота поперечных сечений. В месте соединения двух соседних участков ротора могут моделироваться различные несовершенства и дефекты соединения – радиальный зазор (коленчатость вала) или излом осей участков.

При построении расчетных моделей роторов учитывается нагрузка от собственного веса, сосредоточенные силы и моменты, а также кинематические воздействия от фундамента через подшипники. Эти нагрузки могут быть постоянными, периодически изменяющимися или произвольно заданными во времени.

При проведении расчетов в начальный момент времени  $t_n = 0$  на роторах задается номинальный крутящий момент, величина которого определяется условиями эксплуатации турбин. После затухания переходных колебаний от начальных условий прикладывается электромагнитный крутящий момент, вызванный коротким

замыканием. Его действие прекращается при  $t = t_k$  (моделируется срабатывание системы защиты), после чего валопровод продолжает совершать свободные колебания. Исследования проводились для различной продолжительности КЗ в диапазоне от 0,01 до 0,3 с, которая существенно влияет на уровень максимальных касательных напряжений, возникающих в различных сечениях валопровода. Ниже приводятся результаты, соответствующие максимальной нагруженности элементов роторов.

Численными исследованиями переходных процессов и касательных напряжений в сечениях валопровода турбины К-220-44-2М установлены наиболее напряженные места при двухфазном коротком замыкании. Это шейки роторов в районе второго подшипника ЦВД (точка 1), второго подшипника ЦНД-1 (точка 2), второго подшипника ЦНД-2 (точка 3), шейки вала в районе 1-го подшипника генератора (точка 4) и вставки (точка 5) между цилиндрами низкого давления турбоагрегата. Изменение касательных напряжений во времени для этих точек показано на рис. 2 и рис. 3, где  $t_k$  – соответствует времени снятия нагрузки.

Исследования воздействий коротких замыканий на крутильные колебания валопровода турбоагрегата К-220-44-2М показали, что максимальный уровень касательных напряжений наблюдается между ротором низкого давления и генератором.

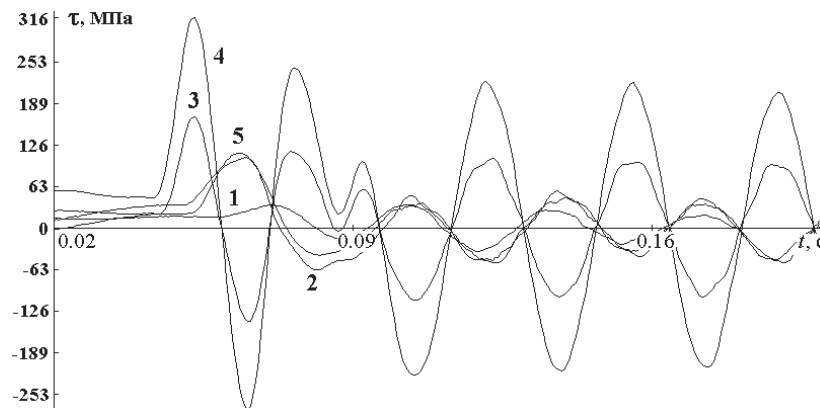


Рис. 2 – Изменение касательных напряжений при  $t_k = 0,1$  с

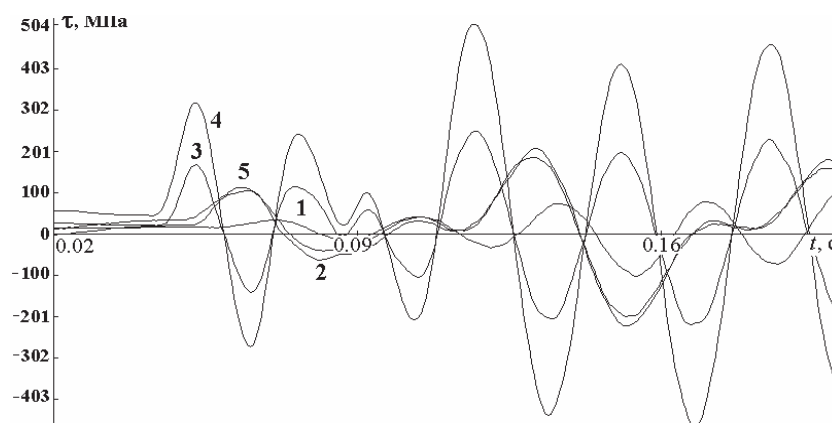


Рис. 3 – Изменение касательных напряжений при  $t_k = 0,11$  с

Критическим сечением этого валопровода является шейка вала в районе подшипника генератора с наружным радиусом 20 см. Сечение ротора ЦНД в подшипнике, ближайшем к генератору, имеет наружный радиус, равный 24 см, максимальные касательные напряжения в этом сечении при двухфазном КЗ достигают

291 МПа. Уровень значений касательных напряжений зависит от фазы снятия нагрузки от короткого замыкания. При увеличении продолжительности КЗ на 0,01 с, касательные напряжения в целом возрастают (рис. 3). При переходе через нулевое значение  $M_{кз}$ , напряжения на следующем обороте продолжают возрастать, а если  $M_{кз}$  достигает в этот момент времени максимума или минимума – напряжения уменьшаются (рис. 2).

Участками с минимальной площадью поперечного сечения и максимальными касательными напряжениями при коротких замыканиях в генераторе турбоагрегата К-325-23,5 являются шейки вала в районе подшипников ЦВД (точка 1), ЦСД (2, 3 и 4), цилиндрическая вставка между ЦСД и ЦНД (5), шейки вала в районе подшипников и середины ротора ЦНД (точки 6, 8 и 7), а также шейки вала в районе первого подшипника генератора (точка 9). Значения максимальных касательных напряжений в этих точках приводятся на рис. 4 и рис. 5 для разных случаев короткого замыкания. Исследования показали, что наиболее нагруженным является участок валопровода между ЦНД и генератором.

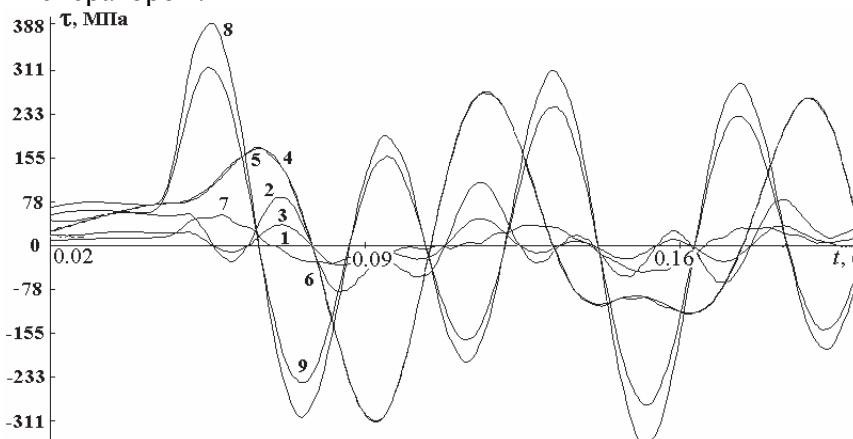


Рис. 4 – Изменение касательных напряжений при двухфазном коротком замыкании ( $t_k = 0,05$  с)

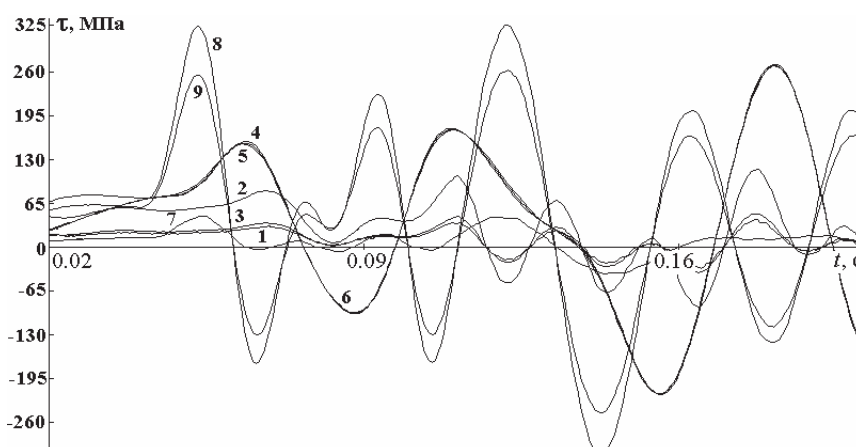


Рис. 5 – Изменение касательных напряжений при трехфазном коротком замыкании ( $t_k = 0,07$  с)

Максимальный уровень напряжений наблюдается в шейке вала второго подшипника ЦНД, наружный радиус которого равен 20 см и несколько меньший – в шейке вала первого подшипника генератора с наружным радиусом 21,9 см. Наибольшие значения напряжений были получены при двухфазном коротком замыкании, действующем в течение 0,5 оборота валопровода (0,01 с). Трехфазное

короткое замыкание (рис. 5) вызывает несколько меньший уровень напряжений в валопроводе, чем двухфазное (рис. 4).

Как показал анализ полученных результатов, от фазы снятия момента короткого замыкания зависит и уровень напряжений, и количество оборотов, за которые колебательный процесс становится установившимся. Максимальный уровень касательных напряжений наблюдается при совпадении времени отключения КЗ с переходом через ноль с максимума на минимум электромагнитного крутящего момента. При прекращении короткого замыкания в другие моменты времени амплитуды колебаний оказываются значительно меньше.

**Выводы.** Проведенные исследования показали, что для рассмотренных турбоагрегатов максимальный уровень напряжений наблюдается на участках между турбиной и генератором. Прочность этих участков и определяет прочность валопроводов в целом. Расчетный анализ длительной прочности и долговечности имеет существенное значение при прогнозировании надежной эксплуатации энергетических машин [7]. Полученные результаты могут быть использованы при оценке усталостной повреждаемости валопроводов турбин вследствие значительного уровня напряжений при крутильных колебаниях, вызванных короткими замыканиями.

**Список литературы:** 1. Разрушение турбоагрегата 300 МВт Каширской ГРЭС: причины, последствия и выводы [Текст] / И. Ш. Загреддинов, А. Г. Костюк, А. Д. Трухний, П. Р. Должанский // Теплоэнергетика. – 2004. – № 5. – С. 5–15. – ISSN 0040-3636. 2. Скручивающие моменты на валу турбоагрегата при отключении коротких замыканий [Текст] / И. А. Глебов, Е. Я. Казовский, Э. Е. Остроумов, Г. В. Рубисов // Электричество. – 1978. – № 2. – С. 22–26. – ISSN 0013-5380. 3. Расчет валопровода турбоагрегата на внезапное короткое замыкание: РТМ 108.021.13-83. – Взамен РТМ 24.021.13-73 ; введ. 01.07.84. – НПО ЦКТИ, 1984. – 28 с. 4. Усталостное повреждение и разрушение роторов паровых турбин в результате крутильных колебаний [Текст] / А. П. Бовсуновский, О. Ю. Черноусенко, Е. В. Штефан, Д. А. Башта // Пробл. прочности. – 2010. – № 1. – С. 144–151. – ISSN 0556-171X. 5. Бовсуновский, А. П. Оценка усталостной поврежденности валопровода паровой турбины в результате крутильных колебаний [Текст] / А. П. Бовсуновский // Пробл. прочности. – 2011. – № 5. – С. 5–20. – ISSN 0556-171X. 6. Бовсуновский, А. П. Крутильные колебания валопровода паровой турбины при нештатных режимах работы турбогенератора [Текст] / А. П. Бовсуновский // Пробл. прочности. – 2012. – № 2. – С. 85–100. – ISSN 0556-171X. 7. Шульженко, Н. Г. Задачи термпрочности, вибродиагностики и ресурса энергоагрегатов (модели, методы, результаты исследований) [Текст] : моногр. / Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровский, Б. Ф. Зайцев. – Saarbrücken, Germany : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2011. –370 с. – ISBN: 978-3-8465-1493-1.

**Bibliography (transliterated):** 1. Zagredtinov, I. Sh., et al. "Razrushenie turboagregata 300 MVt Kashirskoj GRJeS: prichiny, posledstviya i vyvody." *Teplojenergetika* 5 (2004): 5–15. ISSN 0040-3636. Print. 2. Glebov, I. A., et al. "Skruchivajushhie momenty na valu turboagregata pri otkljuchenii korotkih zamykanij." *Jelektrichestvo* 2 (1978): 22–26. ISSN 0013-5380. Print. 3. *RTM 108.021.13-83. Raschet valoprovoda turboagregata na vnezapnoe korotkoe zamykanie*. St. Petersburg : NPO CKTI, 1984. Print. 4. Bovsunovskij, A. P., et al. "Ustalostnoe povrezhdenie i razrushenie rotorov parovyh turbin v rezul'tate krutil'nyh kolebanij." *Probl. prochnosti*. No 1. 2010. 144–151. ISSN 0556-171X. Print. 5. Bovsunovskij, A. P. "Ocenka ustalostnoj povrezhdennosti valoprovoda parovoj turbiny v rezul'tate krutil'nyh kolebanij." *Probl. prochnosti*. No 5. 2011. 5–20. ISSN 0556-171X. Print. 6. Bovsunovskij, A. P. "Krutil'nye kolebanija valoprovoda parovoj turbiny pri neshtatnyh rezhimah raboty turbogeneratora." *Probl. prochnosti*. No 2. 2012. 85–100. ISSN 0556-171X. Print. 7. Shul'zhenko, N. G., P. P. Gontarovskij and B. F. Zajcev. *Zadachi termoprochnosti, vibrodiagnostiki i resursa jenergoagregatov (modeli, metody, rezul'taty issledovanij)*. Saarbrücken, Germany : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2011. ISBN: 978-3-8465-1493-1. Print.

*Поступила (received) 02.02.2015*