

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ПРОЧНОСТИ *им. Г.С.Писаренко*
НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРОБЛЕМЕ
“МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА”

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ УКРАИНЫ
“КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ”

АССОЦИАЦИЯ “НАДЕЖНОСТЬ МАШИН И СООРУЖЕНИЙ”

ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

ТРУДЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
посвященной 100-летию со дня рождения
академика НАН Украины *Г.С. Писаренко*

Киев,

28-30 сентября 2010 г.

Киев 2011

ISBN 978-966-02-2941-6

УДК 539.3:539.4:620.17:621

Прочность материалов и элементов конструкций: Труды Международной научно-технической конференции “Прочность материалов и элементов конструкций” (Киев, 28–30 сентября 2010 г.) / Отв. ред. В.Т. Трощенко. – Киев: Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2011. – 925 с.

В сборник включены доклады Международной научно-технической конференции “Прочность материалов и элементов конструкций” (Киев, 28-30 сентября 2010 г.), посвященной 100-летию со дня рождения академика НАН Украины Г.С. Писаренко. Рассмотрены новые результаты фундаментальных и прикладных исследований в области механики деформируемого твердого тела, динамики и прочности в машиностроении, актуальные направления их развития и применения в технике.

Для научных сотрудников и специалистов в области прочности и ресурса элементов конструкций.

Утверждено к печати Ученым советом Института проблем прочности им. Г.С.Писаренко НАН Украины

International Conference “Strength of Materials and Structural Elements: Proceedings / Ed. V.T. Troschenko – Kyiv, 2011. – 925 p.

The book comprises papers of the International Conference “Strength of Materials and Structure Elements” (Kyiv, September 28-30, 2010), dedicated to the 100-th birthday academic of the Nat. Ac. of Ukraine G.S. Pisarenko. Consider the results of fundamental and applied research in the field of mechanics of a deformable solid, dynamics and strength in machine building and topical directions of their development and technological application.

The book is intended for researches and specialists in the field of strength and life of structural elements.

This work relates to Department of Navy Grant N62909-10-1-1100 issued by U.S. Office of Naval Research Global and U.S. Army International Center-Atlantic. The United States Government has a royalty-free license throughout the word in all copyrightable material contained herein.

ISBN 978-966-02-5941-6

© Ин-т проблем прочности
им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2011

Раздел 1. Динамика машин и сооружений

УДК 621.165.65-192

Сравнительная оценка крутильных колебаний валопровода паровой турбины при двух- и трехфазном коротком замыкании на генераторе

А.П. Бовсуновский

Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Comparative Estimation of Torsional Vibration of Steam Turbine Shaft at Two-Phase and Three-Phase Generator Short Circuit

A.P. Bovsunovsky

G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Ac. Sci. of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Разработана модель для исследования крутильных колебаний валопровода паровой турбины, возникающих при динамическом воздействии генератора на вал турбины. Представлены результаты исследования влияния параметров реактивного крутящего момента при двух- и трехфазном коротком замыкании на генераторе на амплитуду крутильных колебаний системы вал турбины - вал генератора.

Ключевые слова: паровые турбины, короткое замыкание, крутильные колебания, усталостное повреждение.

При некоторых режимах работы турбогенератора, как-то коротком замыкании на генераторе, включении генератора в сеть с грубой синхронизацией, аварийном отключении генератора системой защиты и т.п. [1–4], возникают потенциально опасные крутильные колебания валопровода турбины. Особо опасными являются режимы двух- и трехфазного внезапного короткого замыкания (КЗ) на генераторе [3–5].

С точки зрения механического нагружения КЗ на генераторе или включение генератора в сеть с грубой синхронизацией приводит к кратковременному всплеску реактивного крутящего момента, действующего со стороны генератора на валопровод турбины. В общем случае всплеск

реактивного крутящего момента характеризуется тремя параметрами: амплитудой, продолжительностью и формой.

Опыт эксплуатации паровых турбин свидетельствует о том, что длительность КЗ непредсказуема и составляет от нескольких сотых до нескольких десятых долей секунды. Соотношение между амплитудой всплеска реактивного крутящего момента M_p и суммарным крутящим моментом $M_{сум}$, действующим между валопроводом турбины и генератором, по разным источникам [1, 4] может варьироваться в пределах $M_p=(3...12) \cdot M_{сум}$.

Целью настоящей работы было исследовать влияние длительности и амплитуды КЗ на турбогенераторе на амплитуду крутильных колебаний валопровода турбины, а также выполнить сравнительный анализ степени опасности двух- и трехфазного КЗ для целостности валопровода.

Паровая турбина представляет собой сложную механическую систему, состоящую из роторов высокого (РВД), среднего (РСД) и низкого (РНД)

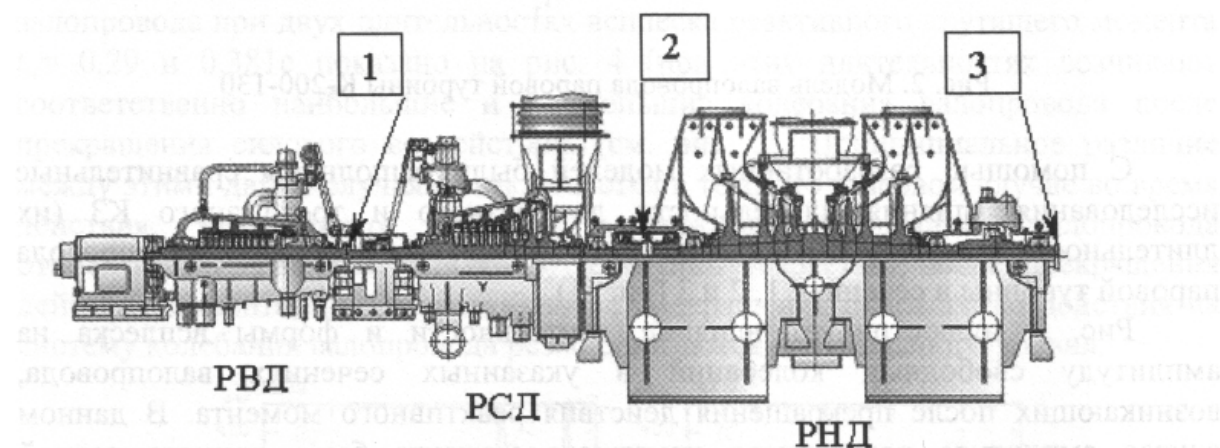


Рис. 1. Паровая турбина К-200-130

давления, и генератора (рис. 1). Исследование вынужденных колебаний такой механической системы, возникающих в результате всплеска реактивного крутящего момента, было выполнено численно с помощью модели валопровода турбины К-200-130 в виде колебательной системы с четырьмя степенями свободы (рис. 2). В модель закладывали инерционные и жесткостные свойства ее валопровода [5].

Крутильные колебания такой механической системы описывали системой четырех дифференциальных уравнений, матричная форма которых имеет вид

$$[I] \left\{ \ddot{\varphi} \right\} + [D] \left\{ \dot{\varphi} \right\} + [K] \left\{ \varphi \right\} = \{M\} F(t), \quad (1)$$

где $[I]$ – матрица моментов инерции масс дисков; $[D]$ – матрица демпфирования; $[K]$ – матрица жесткости; $\{M\}$ – вектор моментов сил; $F(t)$ – функция вынуждающей силы; $\{\varphi\}$ – вектор углов поворотов дисков. Форму

всплеска реактивного крутящего момента и его длительность t_M задавали бигармонической функцией вида [4]

$$M_p(t) = M_{\text{сум}} + M_{\text{сум}}(\alpha_0 + \alpha_1 \cdot \sin(\omega t) + \alpha_2 \cdot \sin(2\omega t)), \quad (2)$$

где $\omega=314$ рад/с. При двухфазном КЗ $\alpha_0=1,77$; $\alpha_1=9,7$; $\alpha_2=-4,85$. При трехфазном – $\alpha_0=0,47$; $\alpha_1=6,46$; $\alpha_2=-4,81$.

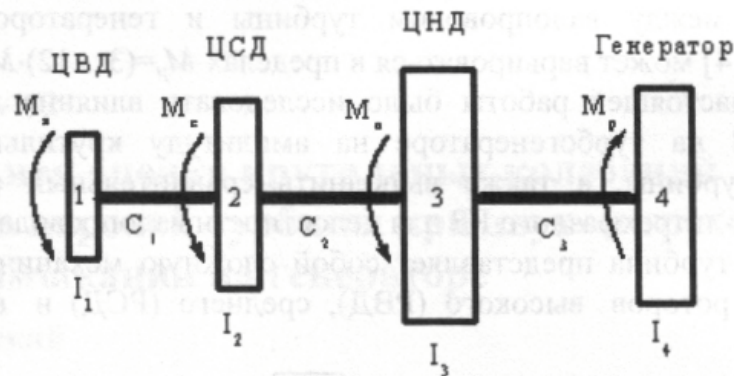


Рис. 2. Модель валопровода паровой турбины К-200-130

С помощью разработанных моделей были выполнены сравнительные исследования влияния длительности двухфазного и трехфазного КЗ (их длительности и амплитуды) на амплитуду крутильных колебаний валопровода паровой турбины в сечениях 1, 2 и 3 (рис. 1).

Рис. 3 иллюстрирует влияние длительности и формы всплеска на амплитуду свободных колебаний в указанных сечениях валопровода, возникающих после прекращения действия реактивного момента. В данном случае амплитуда реактивного крутящего момента была принята равной шестикратному суммарному моменту $M_p=6 \cdot M_{\text{сум}}$. Горизонтальными линиями на рис. 3 показаны также уровни касательных напряжений, соответствующих пределу прочности и пределу выносливости роторной стали 25Х1МФА при двух температурах: $\tau_s(20^\circ\text{C})=500$ МПа; $\tau_s(500^\circ\text{C})=390$ МПа; $\tau_l(20^\circ\text{C})=230$ МПа; $\tau_l(500^\circ\text{C})=160$ МПа.

Как видно из рис. 3, влияние продолжительности КЗ на амплитуду максимальных касательных напряжений имеет сложный периодический характер. Практически при любой продолжительности КЗ сечение 2 является наиболее напряженным. При исследованной амплитуде двухфазного КЗ касательные напряжения в этом сечении валопровода при некоторых значениях t_M превышают предел прочности роторной стали при высокой температуре, что говорит о возможности мгновенного разрушения валопровода при указанных параметрах силового воздействия на валопровод со стороны генератора. В сечении 3 имеет место превышение амплитудой напряжений предела выносливости роторной стали как при высокой, так и при низкой температуре. При трехфазном КЗ амплитуды крутильных колебаний исследованных сечений валопровода значительно ниже, чем при двухфазном при сопоставимых условиях (рис. 3, б)

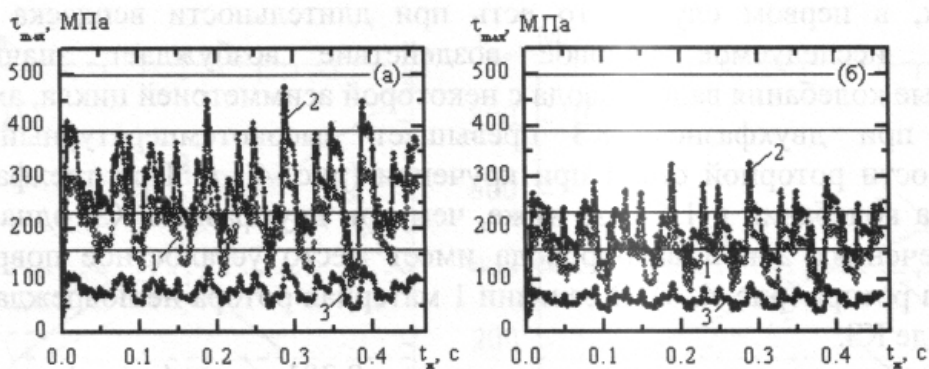


Рис. 3. Зависимости амплитуды максимальных касательных напряжений в сечениях 1, 2 и 3 валопровода турбины от длительности всплесков реактивного крутящего момента с амплитудой $M_p = 6 \cdot M_{сум}$ при двухфазном (а) и трехфазном (б) коротком замыкании на генераторе

Развитие колебательных процессов в рассматриваемых сечениях валопровода при двух длительностях всплеска реактивного крутящего момента $t_m = 0,29$ и $0,381$ с показано на рис. 4 (при этих длительностях возникают соответственно наибольшие и наименьшие колебания валопровода после прекращения силового воздействия, см. рис. 3). Принципиальное различие между этими двумя случаями заключается в том, что в первом случае во время действия реактивного момента амплитуда колебаний валопровода относительно невысока, однако существенно возрастает после прекращения действия момента, а во втором – после прекращения силового воздействия на систему колебания валопровода резко снижаются до неопасного уровня.

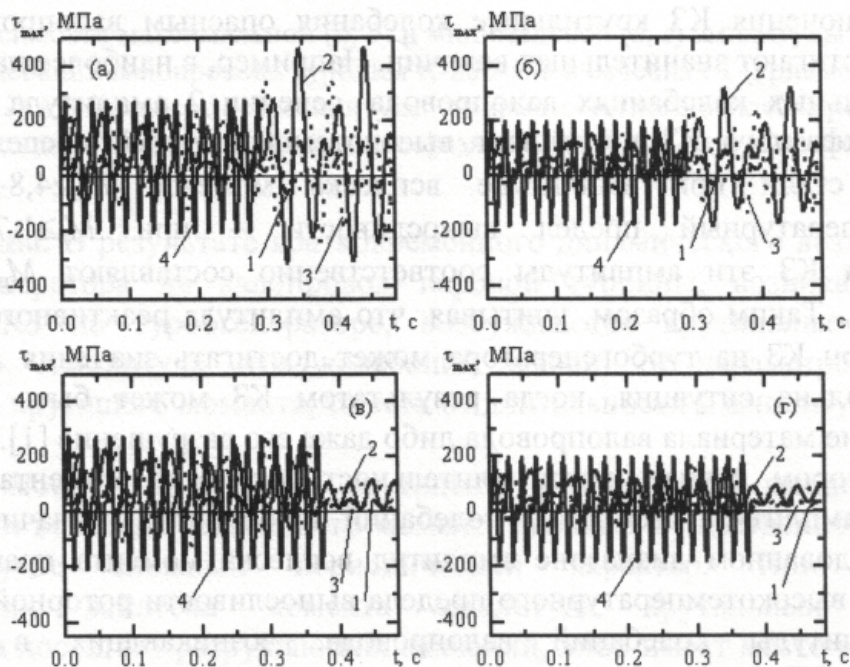


Рис. 4. Развитие колебательных процессов в сечениях 1, 2 и 3 валопровода турбины при бигармоническом всплеске реактивного крутящего момента с длительностью $t_m = 0,29$ с (а, б) и $0,381$ с (в, г) и амплитудой $M_p = 6 \cdot M_{сум}$ (кривая 4): (а), (в) – двухфазное КЗ; (б), (г) – трехфазное КЗ

Так, в первом случае, то есть при длительности всплеска момента $t_m=0,381\text{с}$, исследуемое силовое воздействие возбуждает значительные крутильные колебания валопровода с некоторой асимметрией цикла, амплитуда которых при двухфазном КЗ превышает высокотемпературный предел выносливости роторной стали при кручении (рис. 4, а). При трехфазном КЗ амплитуда колебаний в 1,5 раза ниже, чем при двухфазном КЗ, однако и при этом в сечениях 2 и 3 валопровода имеет место усталостное повреждение материала ротора (рис. 4, б). В сечении 1 материал ротора не повреждается при любом виде КЗ.

При длительности всплеска момента $t_m=0,381\text{с}$ (рис. 4, в и г) циклическое повреждение материала ротора возникает лишь во время действия реактивного момента, причем при двухфазном КЗ материал повреждается более интенсивно, чем при трехфазном КЗ. После прекращения силового воздействия указанной длительности со стороны генератора амплитуда крутильных колебаний валопровода резко падает до величин, которые не представляют опасности для его целостности.

Амплитуда колебаний валопровода турбины зависит не только от длительности всплеска реактивного крутящего момента, но также и от амплитуды всплеска. На рис. 5 представлены полученные с помощью модели валопровода паровой турбины К-200-130 зависимости амплитуды максимальных касательных напряжений в трех сечениях валопровода после отключения КЗ длительностью $t_m=0,29\text{с}$ (рис. 5, а и б) и $0,381\text{с}$ (рис. 5, в и г) от амплитуды всплеска реактивного крутящего момента. Первый случай, при длительности всплеска $t_m=0,29\text{с}$, является наиболее опасным, поскольку возникающие после отключения КЗ крутильные колебания валопровода в ряде случаев достигают значительных величин. Например, в наиболее напряженном при крутильных колебаниях валопровода сечении 2 амплитуда напряжений после двухфазного КЗ превышает высокотемпературный предел прочности роторной стали при амплитуде всплеска момента $M_p \geq 4,8 \cdot M_{\text{сум}}$, а ее высокотемпературный предел выносливости – при $M_p \geq 1,7 \cdot M_{\text{сум}}$. При трехфазном КЗ эти амплитуды соответственно составляют $M_p \geq 7,5 \cdot M_{\text{сум}}$ и $M_p \geq 2,1 \cdot M_{\text{сум}}$. Таким образом, учитывая, что амплитуда реактивного крутящего момента при КЗ на турбогенераторе может достигать значения $M_p = 12 \cdot M_{\text{сум}}$, вполне реальна ситуация, когда результатом КЗ может быть усталостное повреждение материала валопровода либо даже его разрушение [1].

Во втором случае, когда длительность всплеска момента составляет $t_m=0,381\text{с}$, амплитуда свободных колебаний валопровода незначительна и во всем исследованном диапазоне амплитуд всплеска момента практически не превышает высокотемпературного предела выносливости роторной стали. При этом амплитуды колебаний валопровода, возникающих в результате трехфазного КЗ, несколько ниже тех, которые образуются при двухфазном КЗ. Во всем исследованном диапазоне амплитуд всплеска момента практически не превышает высокотемпературного предела выносливости роторной стали. При этом амплитуды колебаний валопровода, возникающих в результате трехфазного КЗ, несколько ниже тех, которые образуются при двухфазном КЗ.

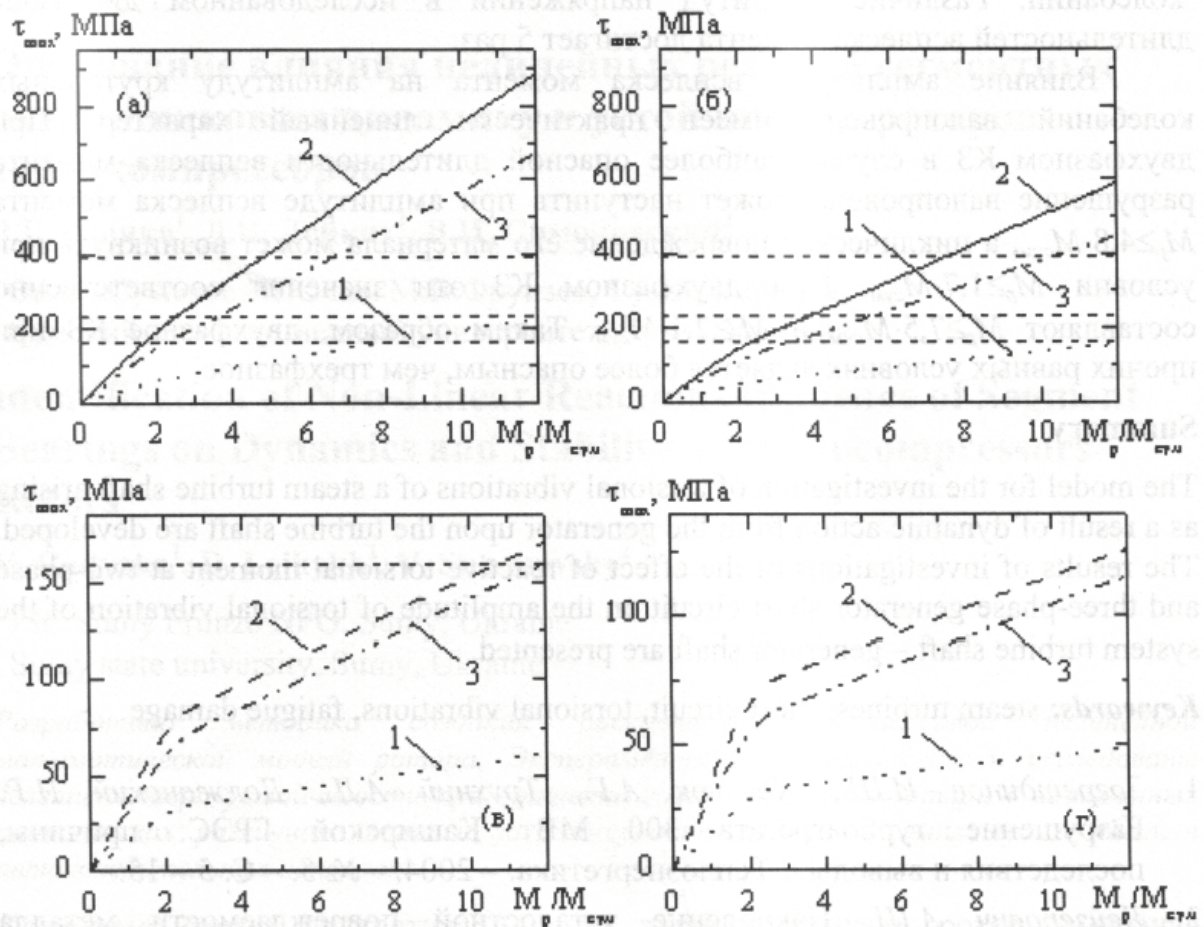


Рис. 5. Зависимости максимальной (а, б) и минимальной (в, г) амплитуды крутильных колебаний валопровода турбины К-200-130 в сечениях 1 (кривые 1), 2 (кривые 2) и 3 (кривые 3) от амплитуды бигармонического всплеска реактивного крутящего момента: (а), (в) – трехфазное КЗ; (б), (г) – двухфазное КЗ

Выводы. В результате кратковременного динамического воздействия со стороны генератора на валопровод паровой турбины, возникающем при внезапном КЗ на турбогенераторе, возбуждаются крутильные колебания валопровода. Амплитуда этих колебаний зависит от параметров всплеска реактивного крутящего момента, то есть от длительности и амплитуды, а также от вида КЗ.

Зависимость амплитуды крутильных колебаний валопровода от длительности всплеска реактивного момента является существенной и имеет в общем случае сложный периодический характер. При некоторых длительностях всплеска момента амплитуда крутильных колебаний валопровода достигает разрушающих значений, либо имеет место интенсивное повреждение материала ротора от циклических нагрузок. Такие случаи являются наиболее опасными при эксплуатации турбины. При других, неопасных, длительностях всплеска реактивного момента повреждений материала валопровода не происходит вследствие незначительности его

колебаний. Различие амплитуд напряжений в исследованном диапазоне длительностей всплеска момента достигает 5 раз.

Влияние амплитуды всплеска момента на амплитуду крутильных колебаний валопровода имеет практически линейный характер. При двухфазном КЗ в случае наиболее опасной длительности всплеска момента разрушение валопровода может наступить при амплитуде всплеска момента $M_p \geq 4,8 \cdot M_{сум}$, а циклическое повреждение его материала может возникнуть при условии $M_p \geq 1,7 \cdot M_{сум}$. При двухфазном КЗ эти значения соответственно составляют $M_p \geq 7,5 \cdot M_{сум}$ и $M_p \geq 2,1 \cdot M_{сум}$. Таким образом, двухфазное КЗ при прочих равных условиях является более опасным, чем трехфазное.

Summary

The model for the investigation of torsional vibrations of a steam turbine shaft arising as a result of dynamic action from the generator upon the turbine shaft are developed. The results of investigations of the effect of reactive torsional moment at two-phase and three-phase generator short circuit on the amplitude of torsional vibration of the system turbine shaft – generator shaft are presented.

Keywords: steam turbines, short circuit, torsional vibrations, fatigue damage.

1. *Загретдинов И.Ш., Костюк А.Г., Трухний А.Д., Должанский П.Р.* Разрушение турбоагрегата 300 МВт Каширской ГРЭС: причины, последствия и выводы // Теплоэнергетика. – 2004. – № 5. – С. 5 – 15.
2. *Лейзерович А.Ш.* Накопление усталостной повреждаемости металла роторов паровых турбин из-за колебательных крутильных нагрузок, вызванных взаимодействием с энергосистемой // Энергохозяйство за рубежом. – 1982. – № 4. – С. 12 – 16.
3. *Глебов И.А., Казовский Е.Я., Остроумов Э.Е., Рубисов Г.Е.* Скручивающие моменты на валу турбоагрегата при отключении коротких замыканий // Электричество. – 1978. – № 2. – С. 22 – 26.
4. *Лютер Р.А.* Расчет моментов вращения синхронных машин при коротких замыканиях // Сб. «Электросила», № 7, 1950.
5. *Бовсуновский А.П., Черноусенко О.Ю., Штефан Е.В., Баица Д.А.* Усталостное повреждение и разрушение роторов паровых турбин в результате крутильных колебаний // Пробл. прочности. – 2010. – № 1. – С. 144 – 151.