

## Крутильные колебания и повреждаемость валопроводов турбоагрегатов при нештатном нагружении генератора\*

Н. Г. Шульженко<sup>а,1</sup>, П. П. Гонтаровский<sup>а</sup>, Н. Г. Гармаш<sup>а</sup>, Н. Н. Гришин<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина

<sup>б</sup> ОАО “Турбоатом”, Харьков, Украина

<sup>1</sup> shulzh@ipmach.kharkov.ua

*Рассматриваются крутильные колебания валопроводов турбин при внезапном нагружении ротора генератора, обусловленном двух- и трехфазным коротким замыканием. Оценена усталостная повреждаемость валопроводов при наиболее неблагоприятных режимах нагружения.*

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

**Введение.** Важной задачей современного турбостроения является обеспечение прочности элементов турбоагрегата при его работе на различных режимах. Одной из причин разрушений валопроводов может быть накопление усталостной повреждаемости вследствие интенсивных крутильных колебаний [1, 2], вызванных чаще всего воздействиями со стороны генератора. При этом значительная динамическая нагрузка возникает при нештатных режимах работы генератора (короткое замыкание (КЗ), включение в сеть с грубой синхронизацией, быстрое повторное включение после прекращения действия короткого замыкания и т.д.). При коротких замыканиях на ротор генератора в течение 0,01...0,26 с действуют значительные электромагнитные крутящие моменты [3, 4], превышающие номинальные в 8–10 раз при наиболее неблагоприятных случаях.

Влияние крутильных колебаний валопровода, возникающих при нештатных режимах работы турбогенератора, на прочность роторов паровых турбин рассматривалось в работах [5–7]. Исследования переходных процессов осуществлялись численно для валопровода паровой турбины мощностью 200 МВт. Оценивалась степень его усталостной повреждаемости при крутильных колебаниях. В [5] использовалась трехмерная конечноэлементная модель валопровода без учета влияния ротора генератора при нагружении в виде кратковременного прямоугольного импульса, превышающего номинальный момент в шесть раз. В [6, 7] усталостная повреждаемость при крутильных колебаниях оценивалась численно с помощью упрощенной дискретной модели валопровода с четырьмя сосредоточенными массами, обладающими моментами инерции и соединенными упругими элементами. Исследовалось влияние параметров и формы всплеска крутящего момента на степень повреждаемости материала валопровода. Наряду с прямоугольным импульсом рассматривались и иные формы момента при коротком замыкании [8]. Показаны возможность накопления усталостной повреждаемости вала турбины в течение длительного периода эксплуатации, достижение предельного состояния и, как следствие, разрушение. В указанных работах отмечается, что крутильные колебания вала турбины, возникающие при нештатных ситуациях, зависят от времени действия реактивного момента, которое является случайным.

\* Доклад на 5-й международной научно-технической конференции “Проблемы динамики и прочности в турбомашиностроении” (Турбо-2014) (27–30 мая 2014 г., Киев).

Учитывая многообразие нештатных режимов эксплуатации, при которых ротор генератора подвергается быстрым изменениям крутящего момента, неоднозначность полученных выводов о их влиянии на ресурс валопроводов и зависимость результатов от динамических и прочностных свойств, дальнейшие исследования этих вопросов представляются актуальными.

Цель работы заключается в расчетном определении переходных процессов и их влиянии на усталостную прочность валопроводов турбоагрегатов различной мощности при воздействии крутящих моментов на ротор генератора, обусловленных коротким замыканием.

**Постановка задачи.** Переходные крутильные колебания валопроводов турбоагрегатов рассматриваются при двух- и трехфазном коротком замыкании. В отличие от [5–7], участки валопровода моделируются стержнями кусочно-постоянного поперечного сечения с распределенной массой, диски роторов и фланцы представляются сосредоточенными массами и моментами инерции. Решение задачи проводилось на примере турбоагрегатов мощностью 325 и 220 МВт, схемы валопроводов которых показаны на рис. 1.

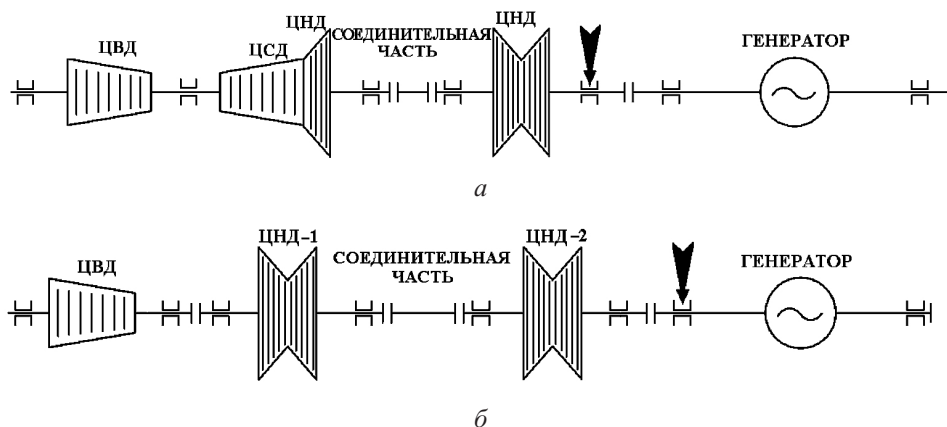


Рис. 1. Схемы валопроводов турбоагрегатов мощностью 325 (а) и 220 МВт (б). (ЦВД, ЦСД, ЦНД – цилиндры высокого, среднего и низкого давления соответственно.)

Расчеты выполнялись с помощью программного комплекса, созданного на основе метода конечных элементов, при непосредственном интегрировании уравнений движения шаговым методом Ньюмарка для решения задач вынужденных изгибных, продольных и крутильных колебаний валопроводов на сложных упругодемпферных опорах. В месте соединения соседних роторов учитываются жесткости стыковочных элементов, а также несовершенство соединения – радиальный зазор (коленчатость вала) или излом осей участков.

При рассмотрении переходных крутильных колебаний валопроводов с использованием созданного программного обеспечения изгибные и продольные колебания не учитывались.

Для описания изменения во времени электромагнитного момента короткого замыкания ( $M_{к.з}$ ), действующего на ротор генератора, использовались зависимости, предложенные в [3] и имеющие в общем случае вид

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

где  $M_H$  – номинальный крутящий момент;  $\omega$  – частота вращения ротора;  $a_{0i}, a_{1i}, a_{2i}, b_{0i}, b_{1i}, b_{2i}$  – постоянные коэффициенты, зависящие от вида короткого замыкания и типа генератора. При трехфазном коротком замыкании коэффициенты  $a_{2i} = 0$ .

**Крутильные колебания валопроводов при воздействии моментов, вызванных короткими замыканиями.** Крутильные колебания и прочность валопроводов турбин рассматривались при внезапном нагружении, обусловленном двух- и трехфазным коротким замыканием с различной продолжительностью действия электромагнитных моментов.

Вначале задавался номинальный момент  $M_H$ , распределенный по ротору генератора, и численно решались уравнения движения до полного затухания переходных процессов, вызванных начальными условиями. Для этого вводилось соответствующее внешнее демпфирование колебаний. После установления переходных процессов к ротору дополнительно прикладывался  $M_{к.з}$  (1), а внешнее демпфирование, исходя из общепринятых представлений [9], задавалось в диапазоне значений, отвечающих логарифмическому декременту колебаний  $\delta = 0,01...0,03$ . Продолжительность действия ( $t_{к.з}$ ) внезапно приложенного момента  $M_{к.з}$  варьировалась в пределах  $0,01...0,26$  с.

На рис. 2 приведено изменение значений относительных упругих моментов  $\bar{M}_k = M_k/M_H$  ( $M_k$  – упругий момент) на участках валопровода турбоагрегата мощностью 325 МВт при различной продолжительности действия момента двухфазного короткого замыкания. Результаты, представленные на рис. 2,а, отвечают колебаниям со сравнительно малыми значениями  $\bar{M}_k$  после снятия  $M_{к.з}$  при  $t_{к.з} = 0,125$  с. Максимальные значения упругого момента  $\bar{M}_k$  существенно зависят от продолжительности действия  $M_{к.з}$  после снятия нагрузки. При  $t_{к.з} = 0,15$  с они значительно больше, чем в предыдущем случае (рис. 2,б), и превышают значения момента на первом всплеске от приложения  $M_{к.з}$ .

На рис. 3 приведены результаты, соответствующие трехфазному короткому замыканию для этого же турбоагрегата. В целом они качественно подобны данным, полученным при действии момента  $M_{к.з}$ , при двухфазном коротком замыкании. Кривые получены для тех же сечений, что и на рис. 2.

Для валопровода турбоагрегата мощностью 220 МВт получены подобные результаты.

Ниже для рассмотренных валопроводов приводится качественная характеристика результатов при  $0,01 < t_{к.з} < 0,26$  с.

Внезапное приложение электромагнитного крутящего момента к роторам при коротком замыкании порождает волновой процесс распространения упругого крутящего момента вдоль валопровода турбоагрегата. При этом упругие крутильные возмущения, вызванные коротким замыканием, достигают противоположного конца валопровода, как правило, за время, соизмеримое с периодом его вращения. Наличие волнового характера распространения возмущения при коротком замыкании сильнее влияет на развиваемые упругие моменты на участках валопровода, которые расположены дальше от генератора. Спектры многочастотной динамической реакции у них разнообразнее, чем на участках, расположенных ближе к месту приложения крутящего момента. Как правило, первые максимальные значения упругих моментов (всплески) наблюдаются на участках возле генератора, по мере удаления от него они уменьшаются, а их возникновение на противоположном конце валопровода по сравнению с таковыми на участках возле генератора запаздывает примерно на  $0,015$  с.

Для оценки ресурса валопровода интерес представляют именно те участки, для которых характерны максимальные уровни упругих напряжений при коротком замыкании (с учетом значений моментов и поперечных сечений роторов). Максимальные упругие моменты существенно зависят как от продолжительности действия момента  $M_{к.з}$ , так и фазового угла его снятия в течение периода колебаний участков валопровода.

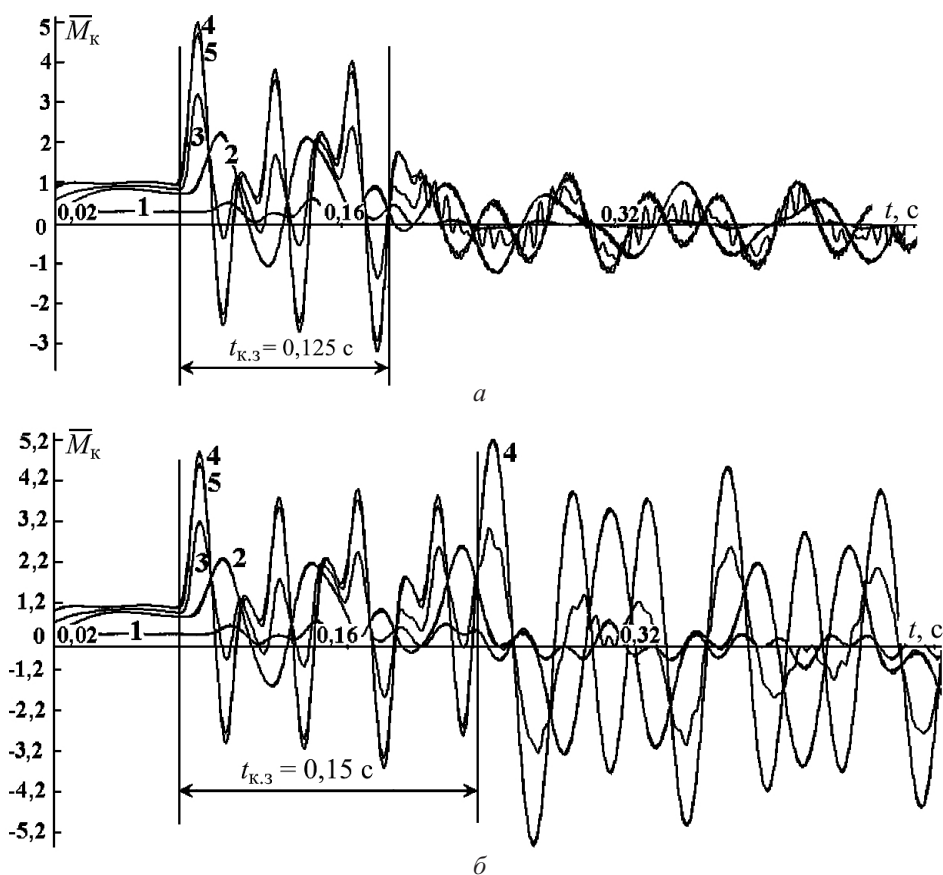


Рис. 2. Изменение упругих моментов при двухфазном коротком замыкании: 1 – шейка ротора в области первого подшипника ЦСД; 2 – шейка ротора в области первого подшипника ЦНД; 3 – сечение на вставке ЦНД; 4 – шейка ротора в области второго подшипника ЦНД; 5 – шейка ротора в области первого подшипника генератора.

провода. В ряде случаев наибольшие их значения наблюдаются при первых всплесках для различных  $t_{к.з}$ . С увеличением  $t_{к.з}$  они могут достигаться после снятия  $M_{к.з}$ . При этом их величина зачастую превышает максимальные значения упругого момента  $\bar{M}_k$ , полученные при меньшей продолжительности  $t_{к.з}$  действия момента  $M_{к.з}$  (рис. 2). Такое явление отмечается, например, при снятии момента короткого замыкания на генераторе ( $M_{к.з} = 0$  при  $t \geq t_{к.з} = 0,15$  с) во время нарастания амплитуды упругого момента в области его нулевых значений на участках, близких к соединительной муфте, которая расположена между генератором и турбиной (рис. 2).

Наблюдаемую в расчетах существенно разную реакцию систем на снятие момента короткого замыкания при различной продолжительности его действия можно объяснить фазностью или противофазностью основных возбуждаемых форм колебаний при наличии нагружающего момента и возбуждаемых собственных форм колебаний после его снятия. При этом амплитуды упругих моментов могут в пять раз и более превышать номинальный крутящий момент генератора или достигать значений, близких к максимальным величинам момента короткого замыкания (1).

Анализ свободных крутильных колебаний рассматриваемого валопровода с разной мощностью показывает, что первые семь собственных частот сопоставимы между собой, а собственные формы колебаний подобны. Среди них наиболее харак-

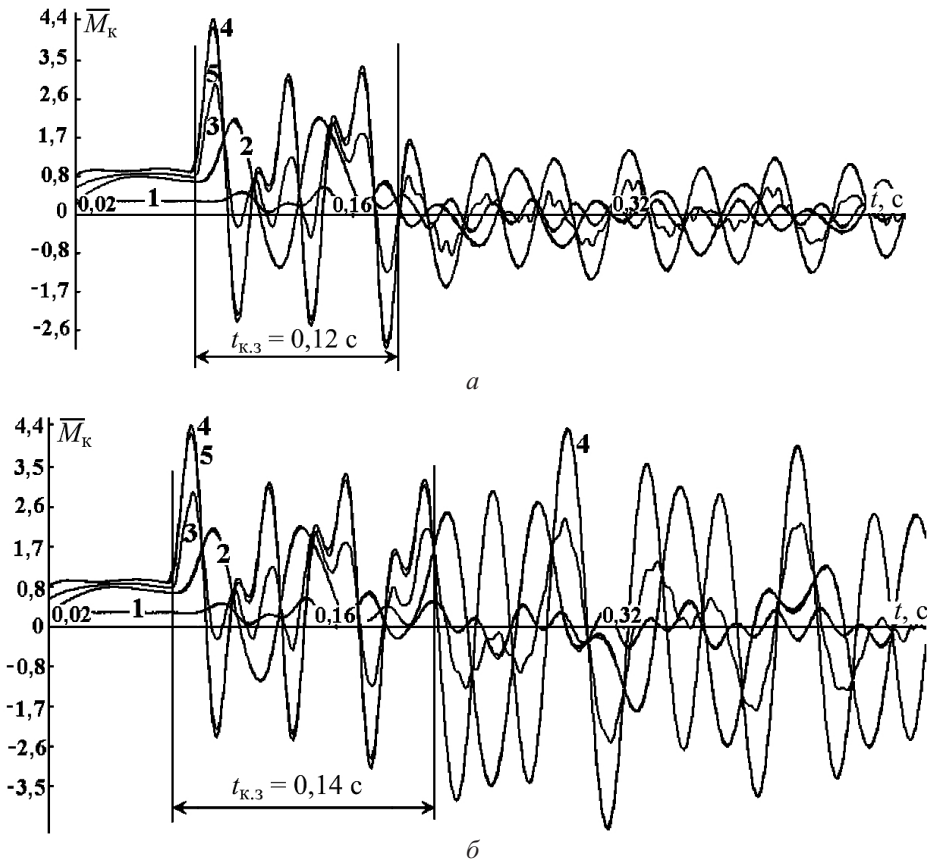


Рис. 3. Изменение упругих моментов при трехфазном коротком замыкании. (Обозначения кривых те же, что и на рис. 2.)

терными являются первая и вторая, а соответствующие им собственные частоты  $\omega$  близки между собой (0,31 и 0,5). В диапазоне до  $3\omega$  содержится по шесть собственных частот и форм крутильных колебаний, поэтому применение четырехмассовых моделей [5, 6] при расчете таких систем неприемлемо, если учитывать, что основная мощность их отклика на рассматриваемое воздействие, как показали исследования, содержится в этой частотной области. Кроме того, дискретные модели не отражают волновой характер динамических процессов от внезапно приложенных моментов короткого замыкания.

**Оценка повреждаемости валопроводов.** При прогнозировании надежной эксплуатации энергетических машин существенное значение имеет расчетная оценка прочности и долговечности их элементов [10]. Поскольку явления, возникающие при нештатных режимах работы турбоагрегата, представляют собой потенциальную опасность, весьма важно оценить степень усталостного повреждения валопроводов вследствие короткого замыкания.

Долговечность валопровода определяется прочностью одного из сечений с максимальным уровнем напряжений. Как показывают проведенные исследования, для данных агрегатов таковыми являются участки шейки подшипников между турбиной и генератором, поперечное сечение которых является минимальным (на рис. 1 сечения отмечены стрелками). В зоне высоких температур роторов ЦВД и ЦСД уровень напряжений значительно ниже. Максимальные касательные напряжения при

скручивании участка возникают на наружной поверхности и после снятия нагрузки от короткого замыкания вследствие затухания колебаний уменьшаются. При этом повреждаемость материала от одного короткого замыкания определяется числом циклов, для которых максимальные значения касательных напряжений превышают предел пропорциональности. Максимальные касательные напряжения могут возникать в области наружной поверхности вала при нескольких первых размахах колебаний или после снятия момента короткого замыкания. Местные пластические деформации при этом можно определить приближенно с использованием принципа Нейбера [11]. Последний позволяет учитывать влияние пластической деформации на предельные состояния конструкций на основе результатов расчета в упругой постановке. Принцип Нейбера рекомендуется для оценки локальных экстремумов напряженности. Поскольку пластические деформации в местах концентрации напряжений, как правило, определяют срок службы детали в целом, он используется при расчете малоциклового усталости элементов конструкций. Согласно данному принципу, по эквивалентному напряжению определяется эквивалентная упругопластическая деформация с помощью соотношения

$$\sigma_y^y \varepsilon_y^y = \sigma_y \varepsilon_y,$$

где  $\sigma_y$ ,  $\varepsilon_y$  – эквивалентные упругопластические напряжения и деформации в зоне концентрации;  $\sigma_y^y$ ,  $\varepsilon_y^y$  – те же напряжения и деформации в упругой постановке.

По амплитуде эквивалентных пластических деформаций и кривой малоциклового усталости определяется число циклов до разрушения:

$$N_1 = f(\varepsilon_{\tau 1}),$$

где  $N_1$  – число циклов;  $\varepsilon_{\tau 1}$  – амплитуда эквивалентных пластических деформаций.

Повреждаемость материала  $\Delta\Pi_1$  за один цикл будет

$$\Delta\Pi_1 = 1/N_1.$$

Амплитуда деформаций  $\varepsilon_{\tau i}$  и повреждаемость  $\Delta\Pi_i$  за каждый последующий  $i$ -й цикл уменьшаются и определяются через амплитуду деформаций предыдущего цикла:

$$\varepsilon_{\tau i} = \varepsilon_{\tau(i-1)} e^{-\delta}; \quad N_i = f(\varepsilon_{\tau i}); \quad \Delta\Pi_i = 1/N_i.$$

Повреждаемость от всех циклов  $\Pi_f$  при одном коротком замыкании определяется суммированием повреждаемости за каждый цикл:

$$\Pi = \sum \Delta\Pi_j = \sum \frac{1}{N_j}.$$

Характеристика затухания колебаний значительно зависит от состава сплава. Материал роторов, содержащий хром, обладает логарифмическим декрементом колебаний  $\delta$ , который в несколько раз выше такового металлов без хрома. В представляющем интерес диапазоне, когда имеет место повреждаемость от усталости, декремент колебаний зависит от амплитуды напряжений и составляет от 0,015 до 0,03 [12]. Кроме внутреннего трения в материале на затухание крутильных колебаний валопровода влияют трение в подшипниках, а также аэродинамическое демпфирование, создаваемое обтекающим потоком. Поэтому при оценке повреждаемости использовались результаты, отвечающие большему значению декремента колебаний  $\delta$  (0,03).

Суммирование повреждения проводится до тех пор, пока повреждаемостью в последнем цикле нагружения можно пренебречь. Как правило, при  $\delta = 0,03$  за этот период наблюдается не более 30–35 циклов.

С помощью таких вычислений определяются повреждаемость  $\Pi$  за одно короткое замыкание и количество коротких замыканий  $N$ , которое может выдержать материал ротора с учетом его характеристик до появления трещины усталости. Для оценки повреждаемости в каждом конкретном случае удобно воспользоваться данными, которые приведены на рис. 4.

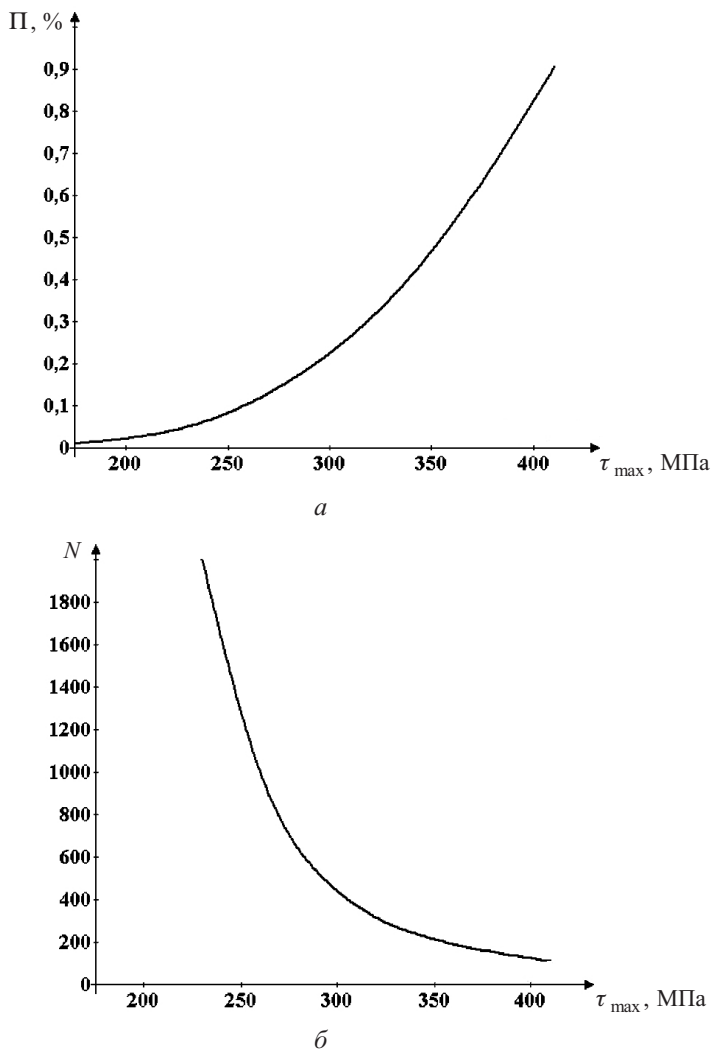


Рис. 4. Зависимость повреждаемости (а) и количества коротких замыканий (б) от максимальных касательных напряжений.

Если декремент колебаний принять в два раза меньшим, количество коротких замыканий, которое может выдержать материал до разрушения, также уменьшится примерно в два раза. С повышением декремента количество коротких замыканий увеличивается. В наиболее неблагоприятных случаях снятия нагрузки от двухфазного короткого замыкания максимальные касательные напряжения в самом опасном сечении валопровода турбоагрегата мощностью 325 МВт между ротором низкого давле-

ния и генератором (на рис. 1,а отмечено стрелкой) составляют 388,7 МПа, что превышает касательные напряжения от номинального крутящего момента в 5,43 раза. Из рис. 4 следует, что разрушение ротора может произойти после 130 таких коротких замыканий. При трехфазном коротком замыкании максимальные касательные напряжения в этом сечении составляют 349 МПа, что выше номинальных касательных напряжений в 4,87 раза. Ротор может разрушиться после 215 коротких замыканий подобного вида.

Исследования воздействий коротких замыканий на крутильные колебания валопровода турбоагрегата мощностью 220 МВт показывают, что максимальный крутящий момент и, как следствие, максимальный уровень касательных напряжений наблюдаются также между ротором низкого давления и генератором. Критическим сечением этого валопровода является шейка вала в области подшипника генератора с наружным радиусом 20 см (на рис. 1,б отмечено стрелкой). Наружный радиус сечения ротора ЦНД в подшипнике, ближайшем к генератору, равен 24 см. Максимальные напряжения в этом сечении при двухфазном коротком замыкании достигают 291 МПа. Ротор ЦНД может выдержать до разрушения примерно 525 таких замыканий. Как отмечалось выше, максимальные касательные напряжения в валопроводе зависят от типа короткого замыкания и его длительности, являющейся случайной величиной. На практике чаще всего напряжения меньше, чем в вышеуказанных наиболее опасных случаях, т.е. валопровод может выдержать большее количество замыканий.

Местные пластические деформации в наиболее опасных сечениях вызывают малоцикловую усталость, которая при нескольких неблагоприятных коротких замыканиях может стать причиной разрушения валопровода.

## Выводы

1. Прогнозирование прочности и ресурса роторов валопроводов с учетом влияния повреждаемости от короткого замыкания в генераторе требует тщательного анализа развиваемых переходных процессов, поскольку результаты существенно зависят от продолжительности действия и времени снятия момента короткого замыкания. Расчетное определение максимальных значений упругих моментов позволяет решать вопросы о выборе сечений наиболее нагруженных элементов для уменьшения или исключения пластических деформаций. При расчетных исследованиях время действия момента короткого замыкания следует наращивать с малым временным шагом, чтобы зафиксировать максимальные значения упругих моментов, в том числе и после снятия  $M_{к.з.}$ . При этом ресурс участков валопровода, определенный по критерию накопления малоцикловой усталости с достижением пластических деформаций, может существенно сокращаться (в несколько раз).

2. Поскольку на величину и характер развиваемых упругих моментов при крутильных колебаниях наряду с коротким замыканием влияют и другие нештатные ситуации (включение в сеть с грубой синхронизацией, быстрые включения после снятия момента короткого замыкания и т.п.), оценку прочности и ресурса роторов эксплуатирующихся агрегатов целесообразно осуществлять по данным измерений крутильных колебаний и регистрации величины возбуждающих моментов в каждой конкретной ситуации.

3. Важное значение имеет разработка счетчика ресурса роторов на основе использования данных непрерывного мониторинга за развитием деформаций кручения при нештатных ситуациях на работающем объекте. Выполненная оценка спектров рассмотренных процессов показывает, что основные составляющие, влияющие на их формирование, отвечают частотам до  $3\omega$ . Это может служить ориентацией при выборе аппаратного обеспечения для организации измерений.



## Резюме

Розглядаються крутильні коливання валопроводів турбін при раптовиху навантаженнях ротора генератора, зумовлених дво- і трифазним коротким замиканням. Оцінено втомну пошкодженість валопроводів за найбільш несприятливих режимів навантаження.

1. *Загреддинов 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. *Глебов И. А., Казовский Е. Я., Остроумов Э. Е., Рубисов Г. В.* Скручивающие моменты на валу турбоагрегата при отключении коротких замыканий // Электричество. – 1978. – № 2. – С. 22–26.
3. *РТМ 108.021.13-83.* Расчет валопровода турбоагрегата на внезапное короткое замыкание. – Введ. 01.07.84.
4. *Шульженко Н. Г., Воробьев Ю. С.* Численный анализ колебаний системы турбоагрегат–фундамент. – Киев: Наук. думка, 1991. – 232 с.
5. *Бовсуновский А. П., Черноусенко О. Ю., Штефан Е. В., Баишта Д. А.* Усталостное повреждение и разрушение роторов паровых турбин в результате крутильных колебаний // Пробл. прочности. – 2010. – № 1. – С. 144–151.
6. *Бовсуновский А. П.* Оценка усталостной поврежденности валопровода паровой турбины в результате крутильных колебаний // Там же. – 2011. – № 5. – С. 5–20.
7. *Бовсуновский А. П.* Крутильные колебания валопровода паровой турбины при нештатных режимах работы турбогенератора // Там же. – 2012. – № 2. – С. 85–100.
8. *Лютер Р. А.* Расчет моментов вращения синхронных машин при коротких замыканиях // Электросила. – 1950. – № 7. – 29–40.
9. *Вибрации в технике.* Справочник. В 6 т. Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов. – М.: Машиностроение, 1980. – 544 с.
10. *Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Зайцев Б. Ф.* Задачи термочности, вибродиагностики и ресурса энергоагрегатов (модели, методы, результаты исследований). – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2011. – 370 с.
11. *РТМ 108.021.103-85.* Детали паровых стационарных турбин. Расчет на малоцикловую усталость. – Введ. 01.07.86.
12. *Филиппов А. П.* Колебания деформируемых систем. – М.: Машиностроение, 1970. – 736 с.

Поступила 12. 01. 2015