

Быстропротекающие переходные режимы функционирования валопровода мощного турбоагрегата

05, май 2011

авторы: Киселёв М. И., Пронякин В. И.

УДК 658.58

МГТУ им. Н.Э.Баумана
vip-u@yandex.ru

Теоретические исследования качаний – крутильных колебаний вращающегося ротора синхронной электрической машины были начаты работами А.А. Горева [1] и И.Д. Урусова [2, 3]. Важность изучения этого явления в прошлые годы была обусловлена, например, необходимостью обеспечения устойчивости работы синхронной электрической машины, применяемой в качестве привода механизма, ходовая часть которого совершает возвратно-поступательное движение (поршневой компрессор). Неоднократно математически моделировались и переходные процессы в синхронных генераторах, сопровождающие его включение под нагрузку. Практический интерес они представляют для синхронных генераторов большой мощности, функционирующих в составе турбоагрегатов. При их включении в единую энергетическую систему начальное, рассогласование фаз токов ротора и статора, соответствующее моменту включения, может привести к формированию рывка вращательного момента, соответствующего динамическому удару. Они приводят к накоплению усталостных повреждений в материале ротора генератора в области его соединения с секцией валопровода цилиндра низкого давления турбины и, в конечном счете, к снижению прочности, но методы и средства для получения информации о данных процессах до настоящего времени отсутствовали. В последние годы, благодаря применению фазохронометрического метода [4], положение резко изменилось, и регистрация даже малых кратковременных всплесков крутильных колебаний валопровода турбоагрегата (ТА) стала возможной [5].

Турбоагрегат испытывает воздействия со стороны энергосистемы и системы управления в виде воздействия приложенного к ротору генератора динамического, а со стороны турбины механического крутящего момента, действующих на валопровод, сопровождающихся появлением крутильных колебаний, постоянно оказывающих влияние на работу ТА.

Систематическое воздействие крутильных колебаний в процессе эксплуатации агрегата вызывает накопление циклической усталости материала валопровода. Переходные процессы, такие как отключение от сети и включение в сеть генератора (синхронизация), вызывают импульсные скручивающие нагрузки, действующие на валопровод ТА, сокращая ресурс его работы. В связи с этим необходима регулярная регистрация переходных процессов и крутильных колебаний для оценки их влияния на образование кольцевых трещин в роторах и ресурс валопровода ТА.

Переход на режим последовательной прецизионной фазохронометрической регистрации параметров вращения вала открыл благодаря достижению принципиально нового уровня точности дополнительные возможности изучения не только крутильных колебаний валопровода, но и различных переходных процессов, обусловленных электромеханическими связями в генераторе.

Ниже приводятся результаты прецизионного измерительного контроля режима вращения валопровода ТА Т-250 и Т-200 с помощью фазохронометрической системы. Она обладает на промышленной частоте в условиях машинного зала ТЭЦ относительной погрешностью $5 \cdot 10^{-4} \%$ (продолжительность оборота валопровода $T=0,02$ с на частоте 50 Гц), при этом абсолютная погрешность измерения продолжительности оборота не превышает $\pm 1 \cdot 10^{-7}$ с [6].

Измерительный диск, установленный на муфте возбуждатель-генератор валопровода, обеспечивает формирование одного импульса по опорному

каналу и 36 импульсов по информационному каналу за оборот валопровода. На рис. 1 представлен типичный график вариаций продолжительности оборотов валопровода, где по оси абсцисс указан порядковый номер оборота, а по оси ординат – продолжительность оборота, мкс [7].

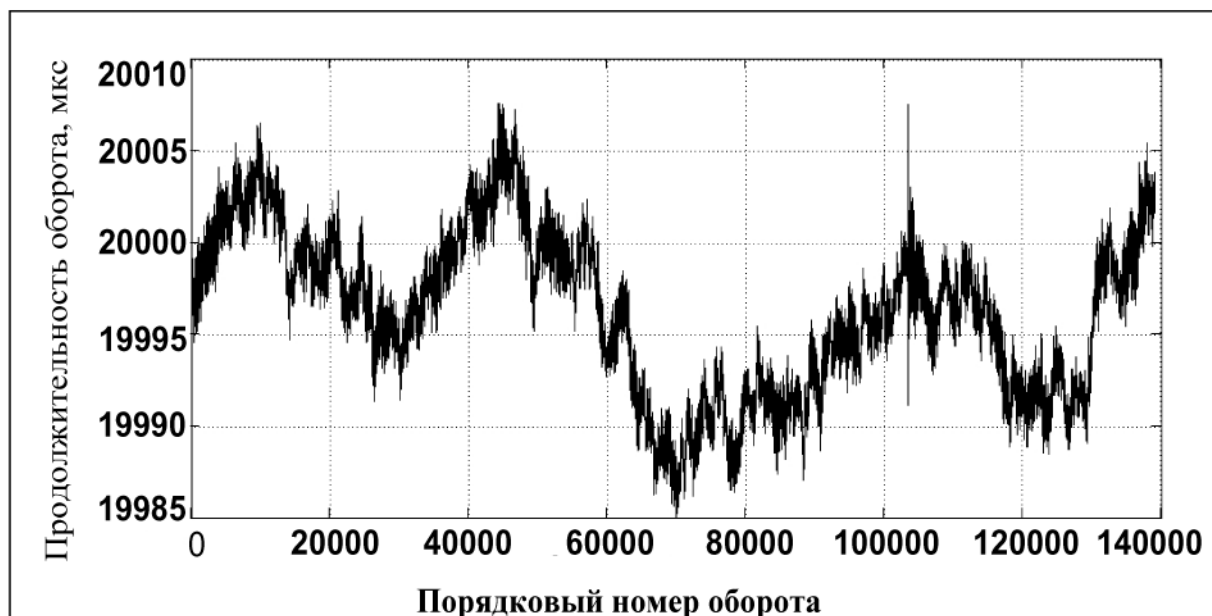


Рис. 1. Вариации продолжительности оборота валопровода.

Далее представлены результаты регистрации быстропротекающих переходных процессов, сопровождающихся вариациями периода вращения и крутильными колебаниями валопровода ТА. К процессам, которым уделяется внимание на ТЭЦ, относятся включение генератора во внешнюю сеть и его отключение от неё.

До внедрения автоматических систем управления синхронизация взаимодействия (согласование фаз токов) ротора генератора и сети осуществлялась перед включением генератора в ручном режиме, а поэтому была не всегда удачной (рис. 2). Как показали измерения, в этом случае синхронизация ротора генератора с внешней сетью сопровождалась резким торможением валопровода ТА с последующими его затухающими крутильными колебаниями.



Рис. 2. Синхронизация ротора генератора с внешней сетью.

При более подробном рассмотрении данного переходного процесса (рис. 3, 4) на несущей частоте вращения наблюдаются крутильные колебания малой амплитуды, являющиеся суперпозицией двух частот, соответствующих крутильной жёсткости ротора генератора и валопровода турбины. Установлено, что данная особенность вращения валопровода ТА сохраняется на всех режимах его работы. После включения генератора в Единую энергетическую систему регистрируется значительное уменьшение вариаций продолжительности оборотов валопровода.



Рис. 3. Детализация синхронизации ротора генератора с внешней сетью.



Рис. 4. Детализация синхронизации ротора генератора с внешней сетью.

Современные автоматические системы управления значительно повышают точность синхронизации при включениях генератора в Единую энергетическую систему (рис. 5), а, следовательно, и снижают нагрузку на валопровод в данном переходном процессе. На рис. 6, 7, 8 представлены более детально последовательные этапы данного процесса.

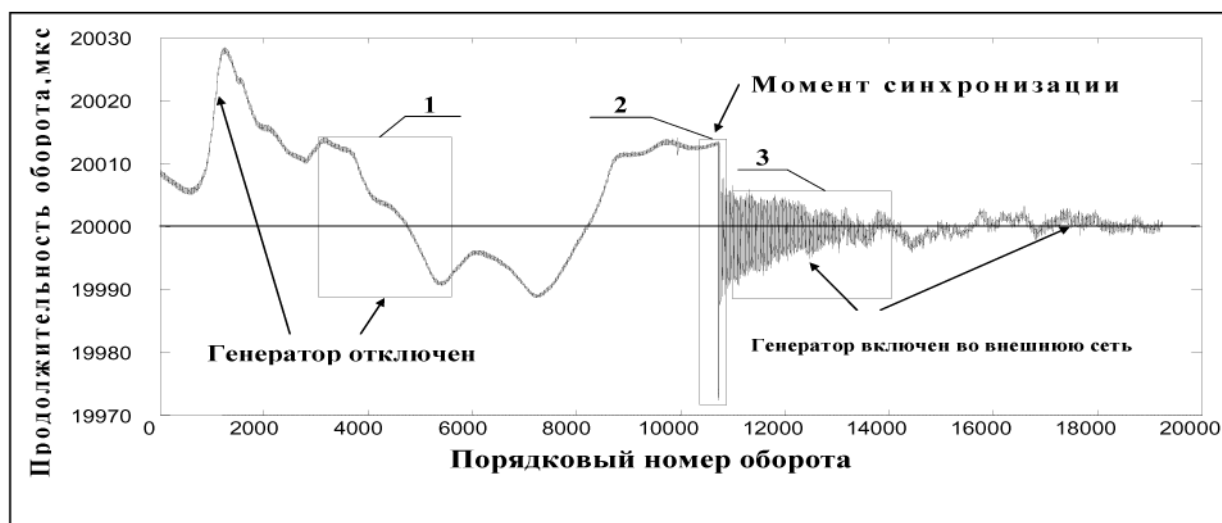


Рис. 5. Автоматическое включение генератора в сеть.

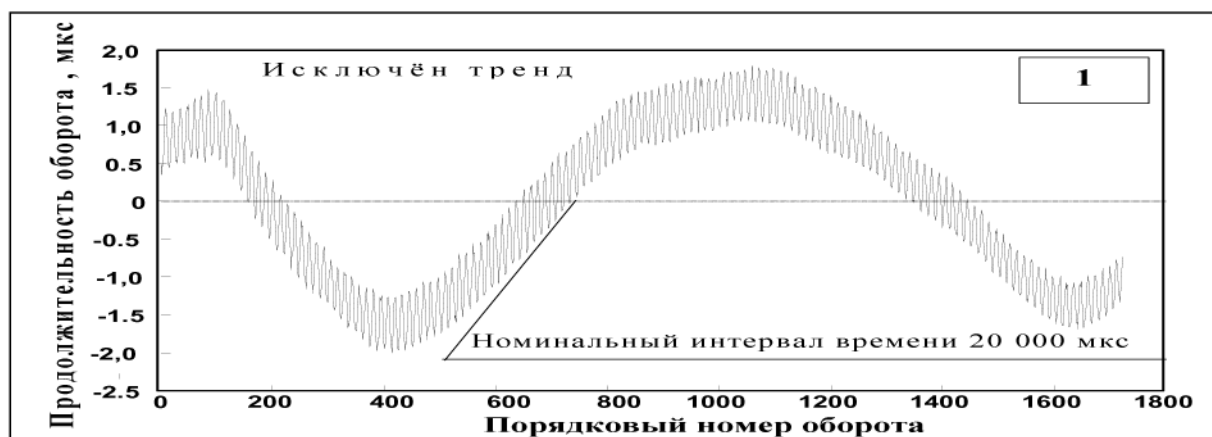


Рис. 6. Детализация синхронизации ротора генератора с внешней сетью.

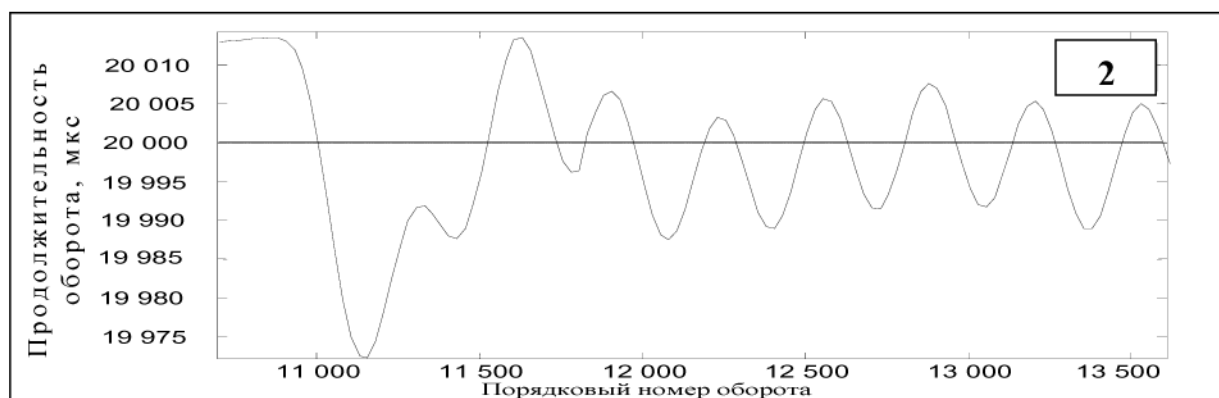


Рис. 7. Детализация синхронизации ротора генератора с внешней сетью.

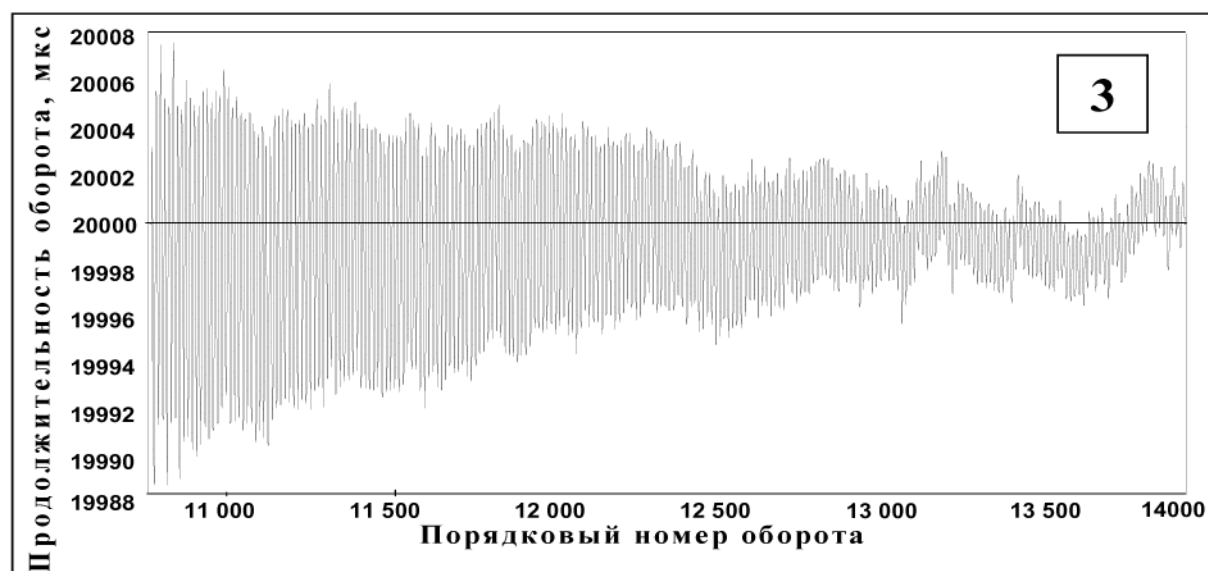


Рис. 8. Детализация синхронизации ротора генератора с внешней сетью.

На рис. 9 показан переходный процесс отключения генератора от внешней сети. При отключении регистрируется резкое замедление вращения,

вызванное увеличением момента сопротивления. На рисунках 10, 11, 12 и 13 последовательно представлены вариации продолжительности оборотов:

- до отключения от сети (рис. 10),
- момент отключения (возрастание момента сопротивления) (рис. 11),
- после отключения от сети (рис. 12).

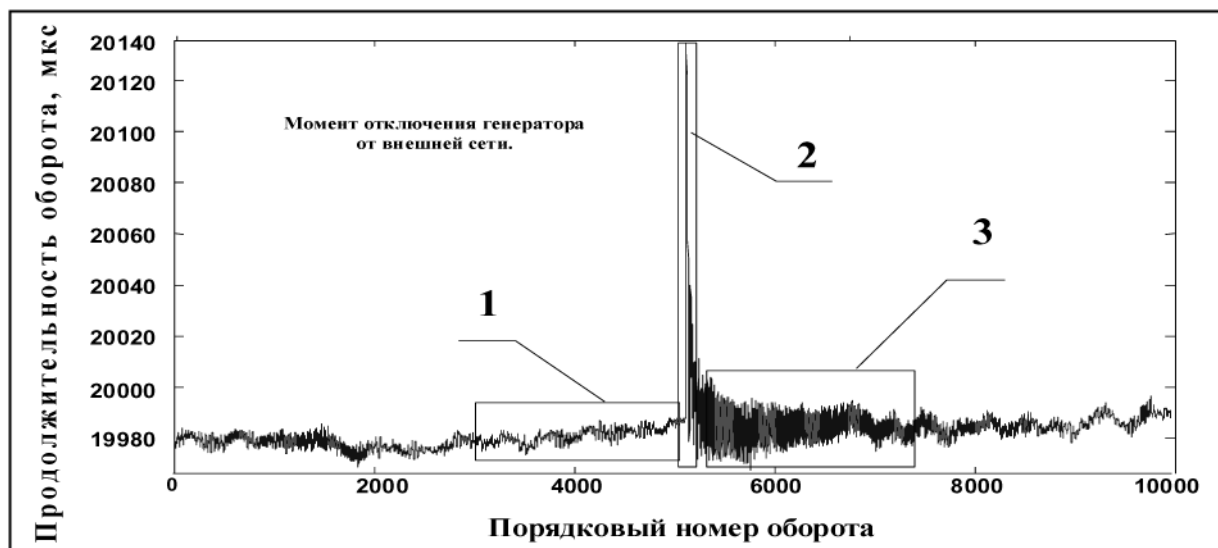


Рис. 9. Отключение генератора от внешней сети

Разброс значений продолжительности оборота валопровода до отключения генератора от сети не превышает 2...2,5 мкс, что соответствует штатному режиму функционирования ТА (рис. 10). Вариации интервалов времени отражают суперпозицию различных мод крутильных колебаний валопровода. Амплитуда крутильных колебаний в данном режиме вращения составляет ~ 4 угловых минуты.

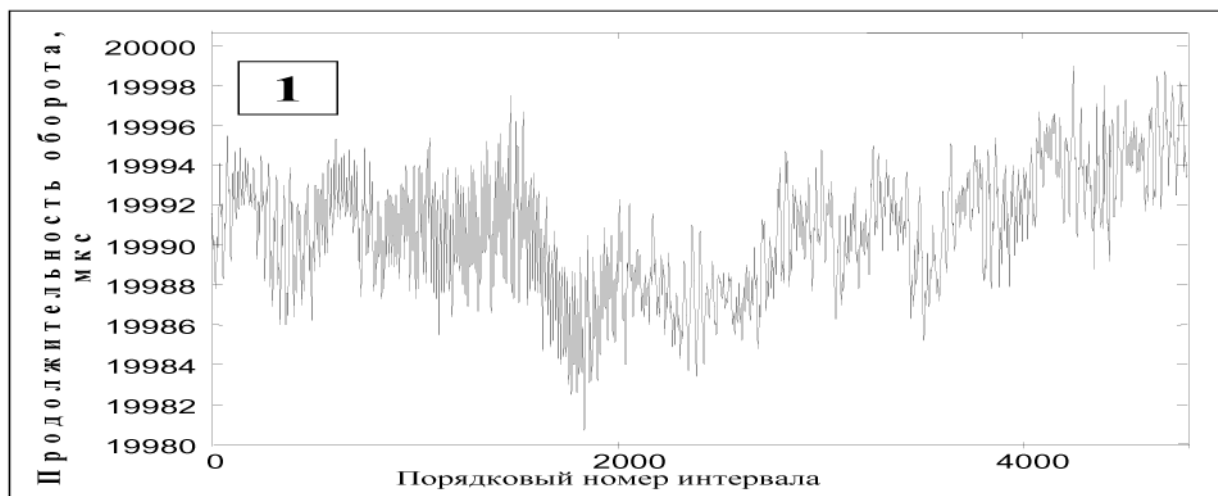


Рис. 10. Элемент процесса отключения генератора от внешней сети.

В момент отключения генератора от внешней сети (рис. 11) продолжительность оборота валопровода кратковременно увеличивается до ~ 140 мкс. Угол закручивания на пике момента сопротивления достигает 86 угловых минут. Длительность данного процесса составила ~ 31 оборот валопровода.

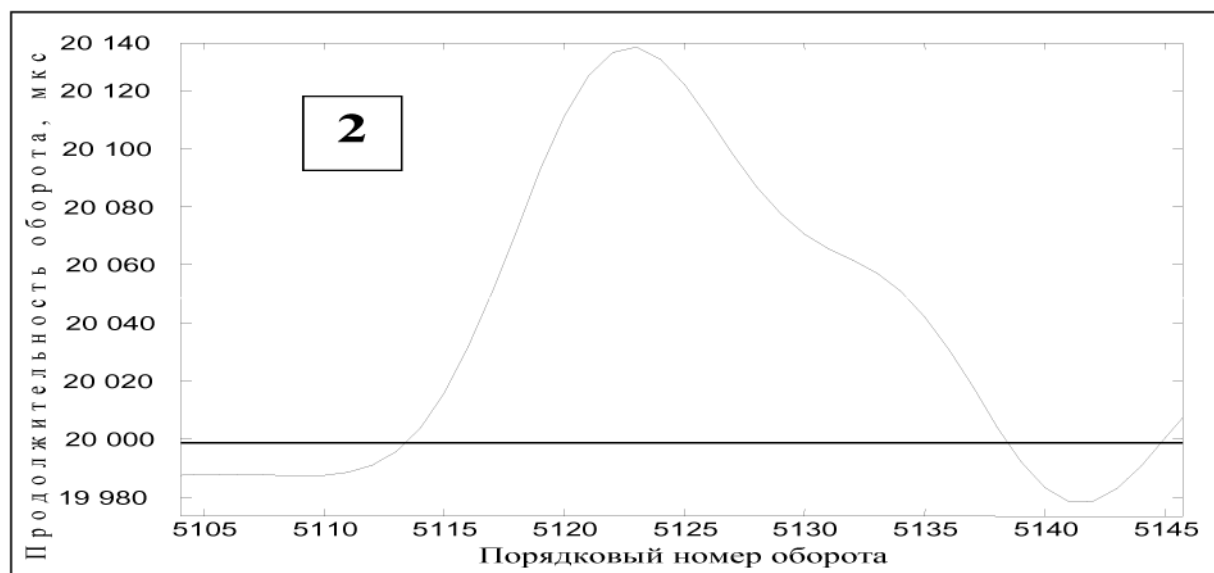


Рис. 11. Элемент процесса отключения генератора от внешней сети.

После кратковременного возрастания момента сопротивления при отключении от сети генератора вариации продолжительности оборота валопровода в 3...4 раза больше, чем при штатном режиме (рис. 12), амплитуда крутильных колебаний возрастает до 17 угловых минут, а возврат в исходное состояние происходит в течение 25...30 оборотов валопровода.

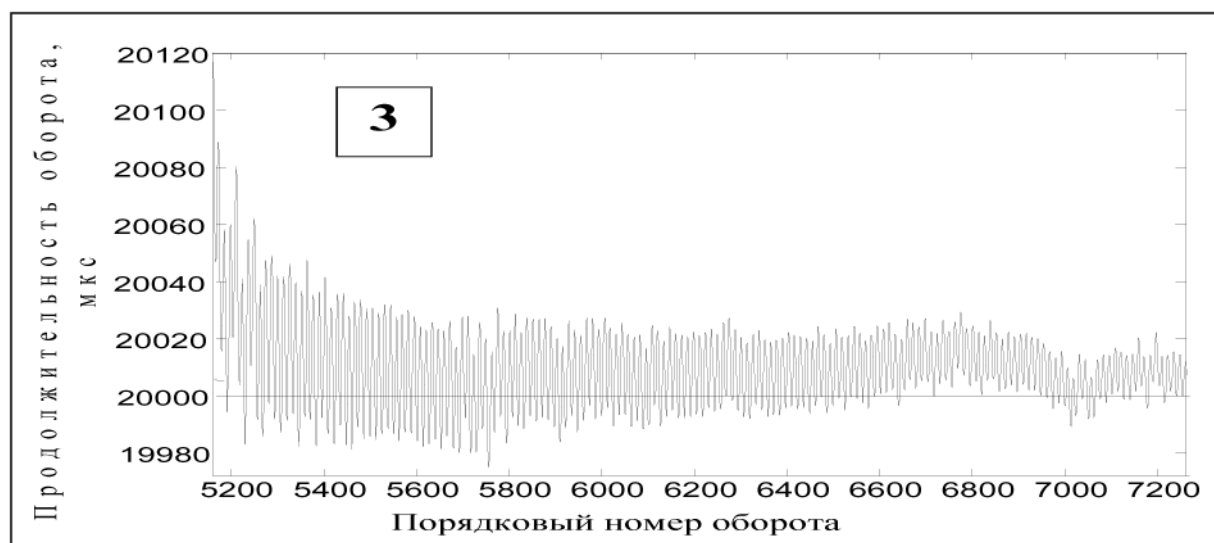


Рис. 12. Элемент процесса отключения генератора от внешней сети.

Изменение характера крутильных колебаний вращающегося валопровода при отключении генератора от сети наглядно представлено на рис. 12.

Последующие записи отключения генератора от внешней сети показали повторяемость регистрируемых переходных процессов (рис. 13).

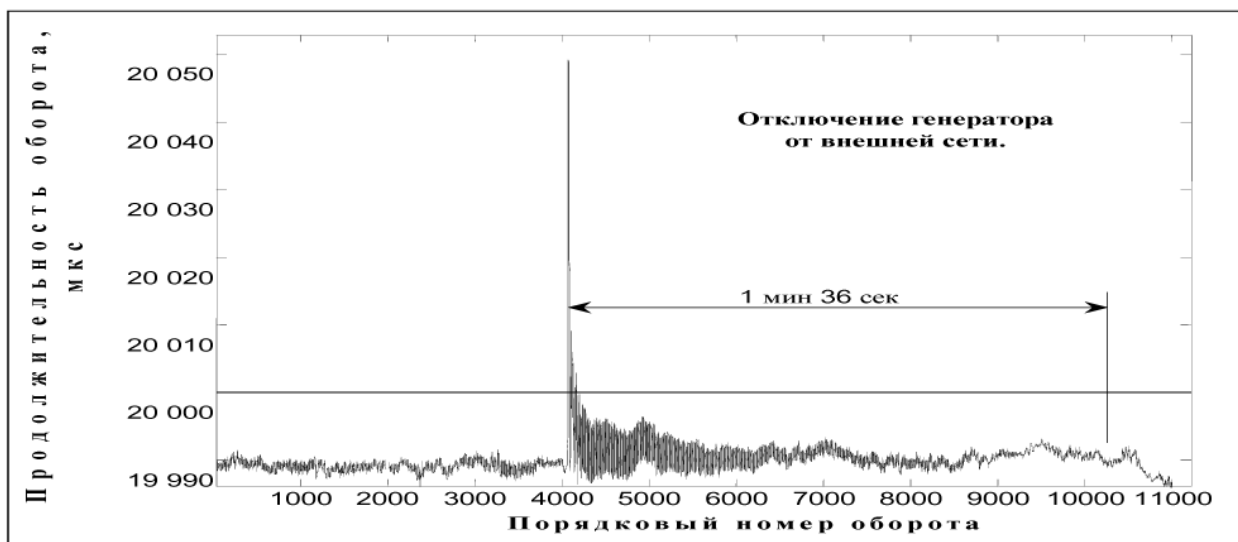


Рис. 13. Отключение генератора от внешней сети.

Обработка результатов измерений и регистрации процессов при отключении генератора от внешней сети (рис. 14) показывает общую повторяемость характеристик переходных процессов вращения валопровода и в то же время, их количественное различие, определяемое режимом функционирования ТА в момент отключения от сети. Это даёт возможность проведения сравнительного анализа этого процесса и выявления устойчивых долговременных диагностических признаков. Выявление индивидуальных характеристик однотипных машин и механизмов обеспечивают прецизионные измерения интервалов времени. Важно отметить относительное совпадение частот и фаз колебаний при вращении валопровода в данный момент, то есть повторяемость, что позволяет сравнивать функционирование ТА на длительных промежутках эксплуатации [8].

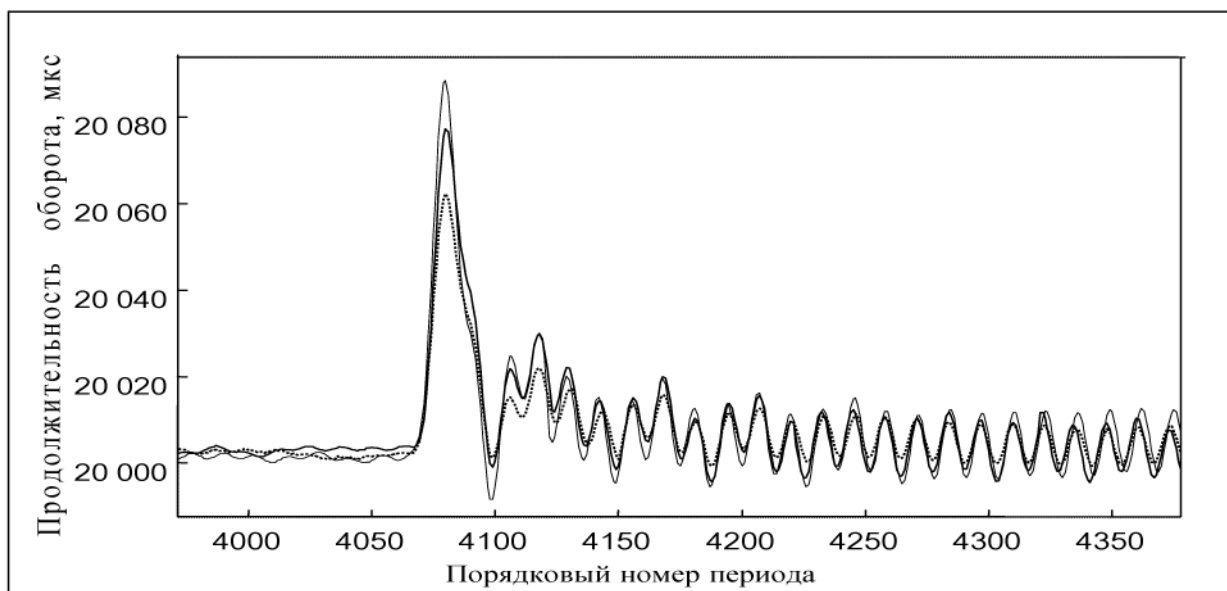


Рис. 14. Сравнение графиков отключения генератора от внешней сети.

Также обнаружено влияние импульсов из внешней цепи на вращение валопровода в процессе функционирования, влияние которых адекватно учитываемым при оценке ресурса валопровода включениям и выключениям генератора из внешней сети (рис. 15, 16). Данные воздействия на режим вращения валопровода штатной контрольно-измерительной аппаратурой не регистрируются и их влияние на остаточный ресурс валопровода в настоящее время не учитывается.

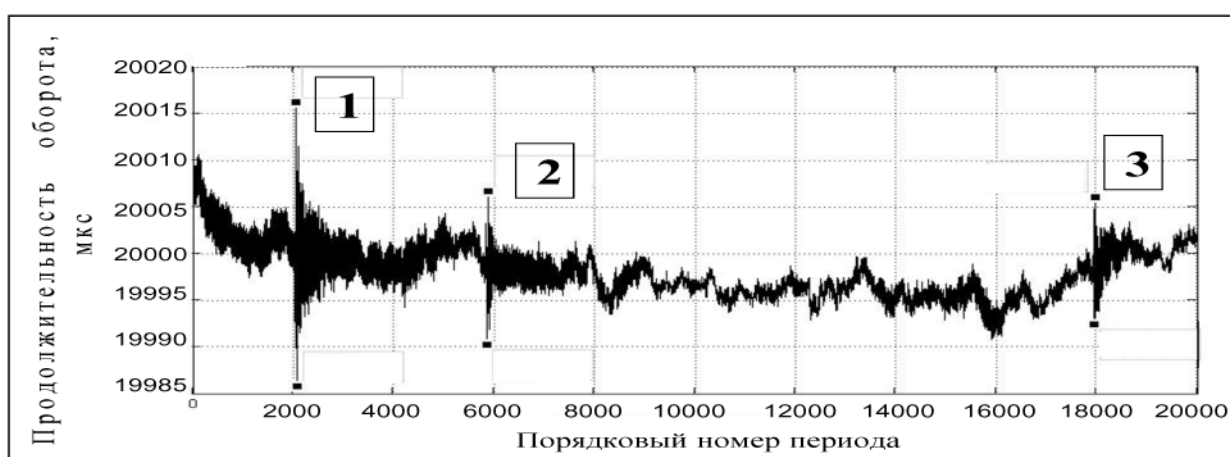


Рис. 15. Изменение вращения валопровода ТА при воздействии импульсов из внешней сети

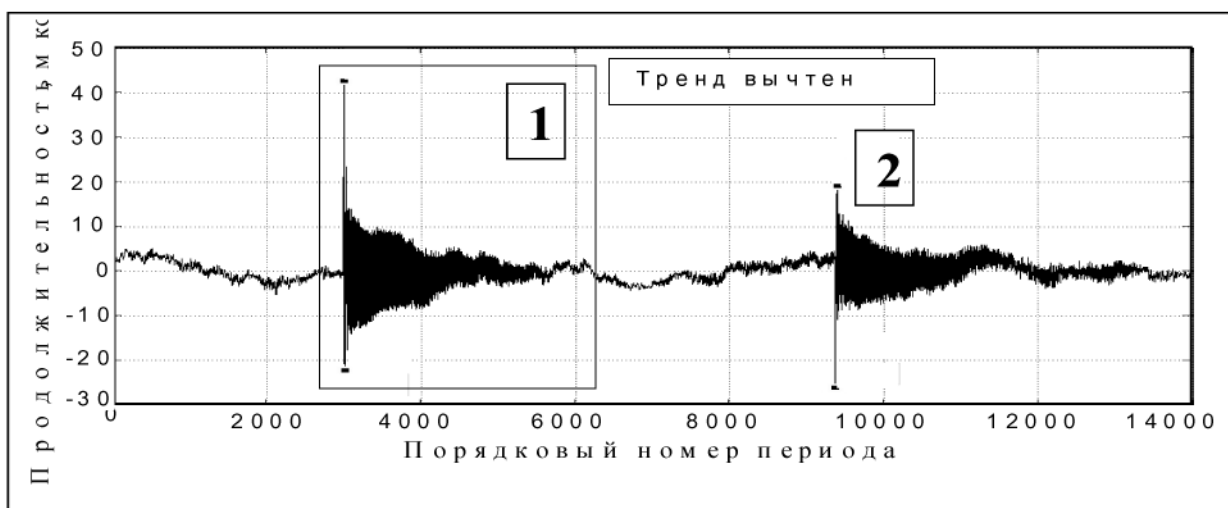


Рис. 16. Детальное представление процесса вращения валопровода

Турбоагрегаты Т-250 и Т-200 аналогичны по конструкции (у Т-200 отсутствует один из цилиндров среднего давления) и фазохронометрирование регистрирует аналогичные переходные процессы (рис. 17, 18) и реакцию на импульсы, приходящие на статор ТА из внешней сети.

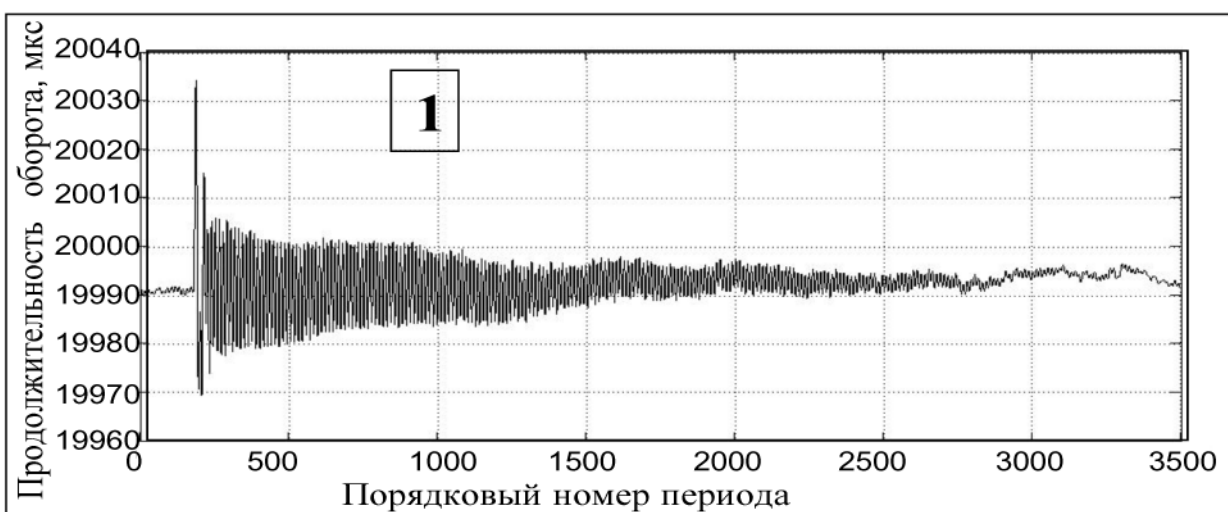
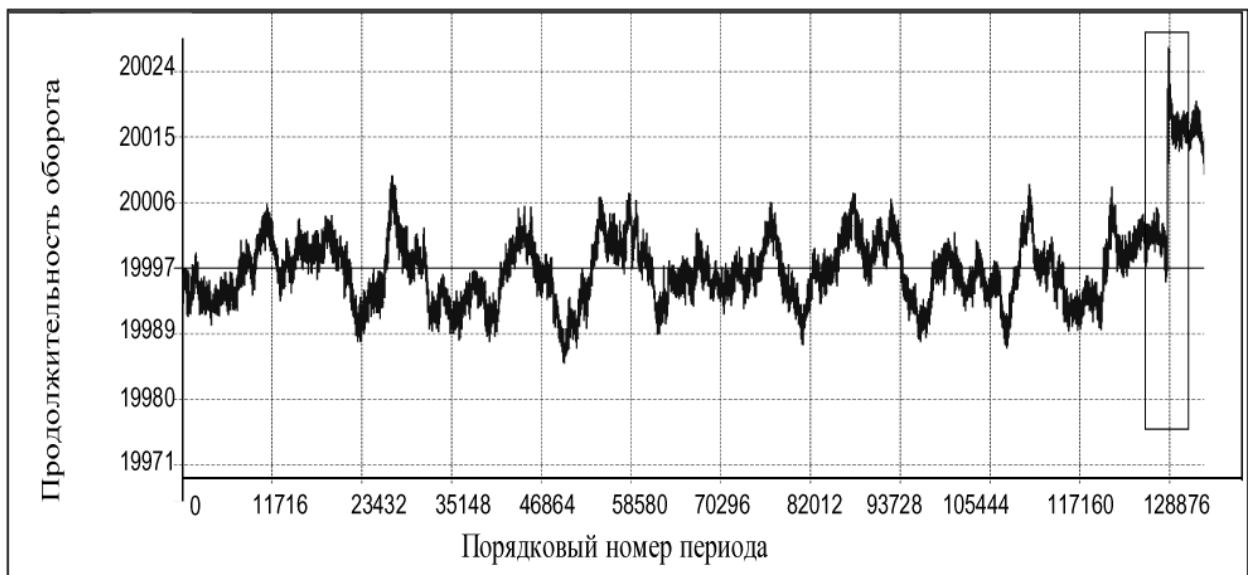


Рис. 17. Детальное представление процесса вращения валопровода



а)



б)

а) периодограмма вращения, б) выделенный фрагмент.

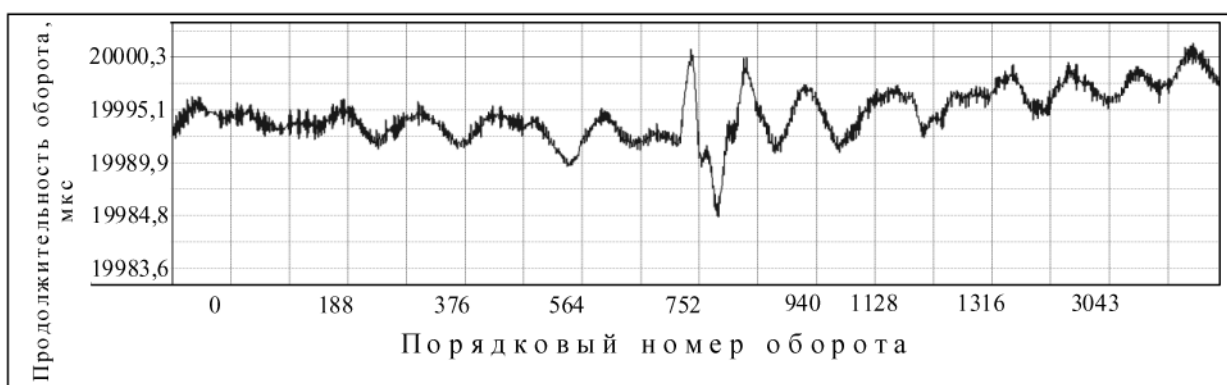
Рис. 18. Изменение параметров вращения валопровода при подключении мощной внешней нагрузки.



а)



б)



в)

а) периодограмма вращения, б) в) выделенный фрагмент.
Рис. 19. Изменение параметров вращения валопровода при воздействии импульса из внешней сети

Спектры крутильных колебаний, построенные с использованием рядов интервалов времени, полученных фазохронометрированием, для турбоагрегатов

одного типа, построенные на длительных промежутках эксплуатации, имеют одинаковый характер при количественных различиях (данный результат вибродиагностикой не достигается).

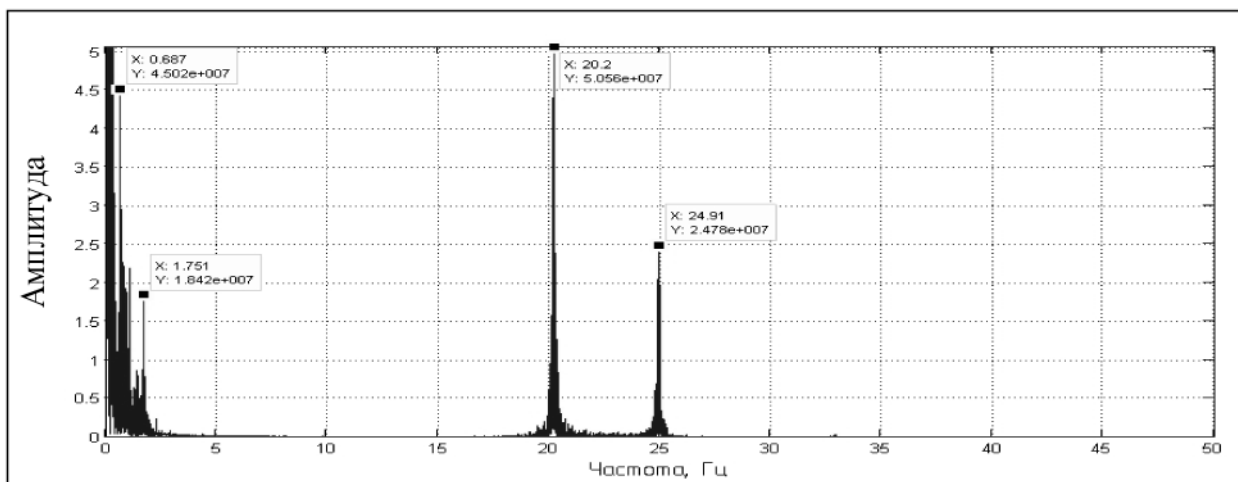


Рис. 20. Спектр крутильных колебаний валопровода турбоагрегата Т-250.

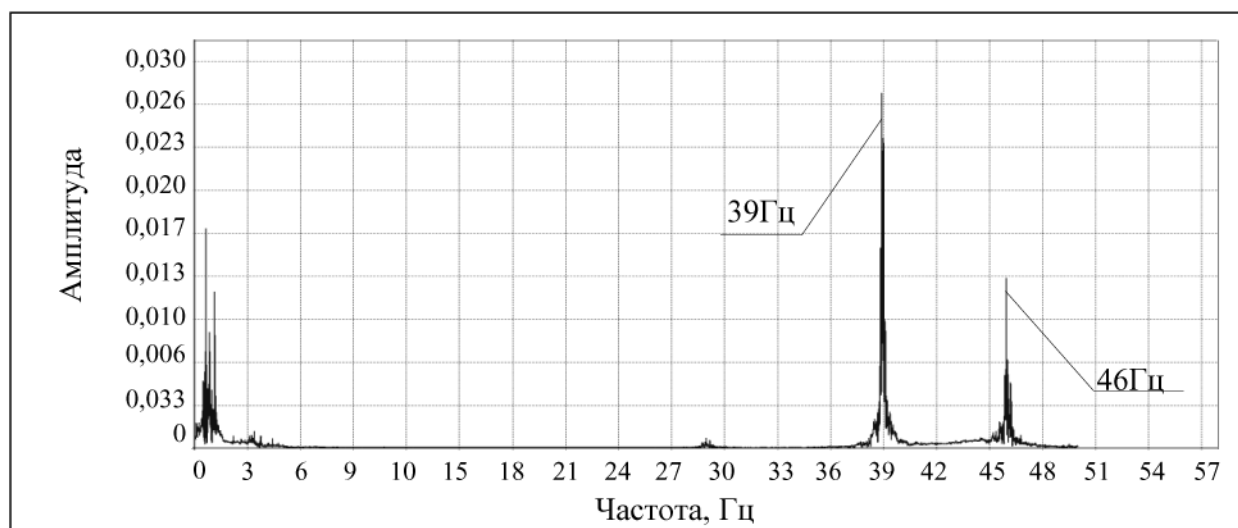


Рис. 21. Спектр крутильных колебаний валопровода турбоагрегата Т-200.

Сравнение результатов измерений параметров вращения валопровода ТА Т-250 с результатами исследований ТА Т-200 позволяет сделать следующие выводы:

- подтверждено, что обработка результатов фазохронометрирования параметров рабочего цикла обеспечивает получение характеристик собственных типу объектов, а прецизионный уровень измерений выявляет индивидуальные характеристики,

- подтверждено наличие устойчивых долгоживущих диагностических признаков, которые являются основой для получения трендов, прогнозирования и определения нормативных показателей,

- подтверждено, что турбоагрегаты, испытывая воздействие системы управления и внешней сети, постоянно работают в переходных режимах.

Анализ экспериментальных данных, полученных для функционирующего ТА, показывает, что крутильные колебания валопровода постоянно присутствуют в рабочем режиме и их амплитуда, как правило, увеличивается в переходных режимах (синхронизация, отключение генератора от сети, процессы во внешней сети). Поскольку процессы включения и выключения ТА осуществляются периодически при его техническом обслуживании, то в условиях быстро стареющего парка генерирующих агрегатов остановки происходят все чаще, что ведет к накоплению усталостных факторов металле валопровода. Аналогично воздействуют импульсы, приходящие из внешней сети. В связи с этим для обеспечения безаварийной работы необходим постоянный измерительно-вычислительный мониторинг работы ТА. Представленная детальность изменения параметров вращения валопровода позволяет оценить воздействие внешней сети и системы управления на валопровод ТА.

Таким образом, фазохронометрические измерения позволяют провести количественный анализ быстропротекающих переходных процессов, не регистрируемых штатным контрольно-диагностическим оборудованием, выполнить регистрацию крутильных колебаний и их количественный анализ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины // М.: ГЭИ. 1950. 335 с.
2. Урусов И.Д. Линейная теория колебаний синхронной машины. Изд-во АН СССР, 1960.

3. Глебов И.А. Системы возбуждения мощных синхронных машин. Л.: «Наука». Ленинградское отделение, 1974, 314 с.
4. Киселёв М.И., Пронякин В.И. Фазовый метод исследования циклических машин и механизмов на основе хронометрического подхода // Измерительная техника. 2001. № 9. С. 15-18.
5. Киселёв М.И., Новик Н.В., Пронякин В.И. Регистрация параметров крутильных колебаний валопровода турбогенератора // Измерительная техника. 2000. № 12. С. 34-36.
6. Киселёв М.И., Зройчиков Н.А., Пронякин В.И., Чивилёв Я.В. Прецизионное исследование работы ТА оптико-электронными средствами // Теплоэнергетика. 2006. №11. С 10-13.
7. Киселёв М.И., Козлов А.П., Пронякин В.И. и др. Измерение периода вращения валопровода ТА фотоэлектрическим методом // Измерительная техника. 1996. № 12. С. 28-29.
8. Пронякин В.И. Проблемы диагностики циклических машин и механизмов // Измерительная техника. 2008. №10. С. 9-13.