

УДК 621.77:62.50

## ПРОИЗВОДСТВО БАНДАЖНЫХ КОЛЕЦ МОЩНЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ: ТЕХНОЛОГИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

Готлиб Б.М., Вакалюк А.А.

ГОУ ВПО «Уральский государственный университет путей сообщения»,  
Екатеринбург, e-mail: gotlib@usurt.ru

Выполнен обзор конструкции ротора турбогенераторов и проведен анализ влияния бандажных колец на надежность турбогенераторов большой единичной мощности. Проведен анализ разновидностей технологических процессов производства бандажных колец методами холодной деформации. В качестве метода холодной деформации выбран процесс гидрорастяжения, как наиболее перспективный и производительный метод холодного упрочнения кольцевых заготовок из немагнитной аустенитной стали. Для выполнения процесса гидрорастяжения выбран комплекс оборудования в составе мощного вертикального гидравлического пресса и насосной станции сверхвысокого давления. Разработана ситуационная автоматизированная система управления процессом гидрорастяжения кольцевых заготовок на гидравлическом прессе усилием 300 МН с применением алгоритмов нечеткой логики и методами параллельного регулирования деформирующими воздействиями.

**Ключевые слова:** турбогенератор, бандажное кольцо, холодная деформация, ситуационное управление, нечеткий контроллер

## RETAINING RING MANUFACTURING FOR HIGH-POWER TURBOGENERATORS: TECHNOLOGY AND CONTROL

Gotlib B.M., Vakalyuk A.A.

Ural state university of railway transport, Ekaterinburg, e-mail: gotlib@usurt.ru

Turbogenerators rotors design overview and retaining rings influence on high-powered turbogenerators reliability analysis were done. There is also made the classification analysis of retaining rings manufacturing processes by cold steel straining method. Hydrostretching is the most prospective and efficient cold steel straining method for nonmagnetic austenitic steel ring blanks. Equipment set composed of powerful hydraulic vertical press and high pressure pumping facility were chosen for hydrostretching process. Situational automated control system of ring blanks hydrostretching process on 300 MN force hydraulic press was designed. Fuzzy-logic algorithms and parallel control methods of straining influence are used for situational automated control system design.

**Keywords:** turbogenerator, retaining ring, cold strain, situational control, fuzzy-logic controller

Турбогенераторы предназначены для выработки электроэнергии в продолжительном номинальном режиме работы при непосредственном соединении с паровыми или газовыми турбинами. Турбогенераторы устанавливаются на тепловых и атомных электростанциях. В последнее время в связи с износом энергетического оборудования резко повысились требования к обеспечению безопасности в области энергетики. Это в первую очередь относится к турбогенераторам большой единичной мощности.

**Цель работы:** повышение качества бандажных колец большого диаметра на основе совершенствования технологии и методов управления процессом их производства.

### Конструктивные особенности мощных турбогенераторов

В зависимости от мощности турбогенераторы подразделяются на три основные группы: мощностью 2,5–32 МВт, 60–320 МВт и свыше 500 МВт. По частоте вращения различают турбогенераторы четырехполюсные (на частоту вращения 1500 и 1800 об./мин) и двухполюсные (на частоту вращения 3000 и 3600 об./мин) соответственно на частоты сети 50 и 60 Гц [5].

Турбогенератор состоит из двух ключевых компонентов – статора и ротора. Ротор – вращающийся компонент генератора и на него воздействуют динамические механические нагрузки, а также электромагнитные и термические. Статор – стационарный компонент турбогенератора, но он также подвержен воздействию существенных динамических нагрузок – вибрационных и крутящих нагрузок, а также электромагнитных, термических и высоковольтных

Вал ротора турбогенератора состоит из средней активной части (бочки) и двух хвостовиков (рис. 1) [7]; он выполняется из единой поковки высокой категории прочности. Материалом вала является высоколегированная сталь, обладающая высокими механическими и магнитными свойствами. Масса ротора крупных двухполюсных турбогенераторов составляет 60–100 т, четырехполюсных 160–200 т, а масса слитка для изготовления вала примерно вдвое больше, что является предельным для современной мировой металлургии [6].

Лобовые части обмотки ротора закрепляют роторными бандажами, состоящими из бандажного и центрирующего колец (см. рис. 1). Различают следующие раз-

новидности установки бандажных колец: жесткая посадка на бочку и вал; посадка на полуэластичное центрирующее кольцо и на бочку ротора с установкой под носик бандажного кольца изоляционной прокладки; посадка на бочку ротора и промежуточную втулку; посадка только на бочку ротора.

Бандажные кольца, жестко установленные на бочку и вал, работают удовлет-

ворительно только в турбогенераторах мощностью не выше 30 МВт, имеющих сравнительно короткие роторы. В турбогенераторах мощностью 50 МВт и выше применяют полуэластичные центрирующие кольца с зигзагообразной выточкой или с более надежной выточкой в виде диафрагмы. В турбогенераторах серии ТГВ применяют бандажи с одной посадкой на бочку ротора – консольные [4].

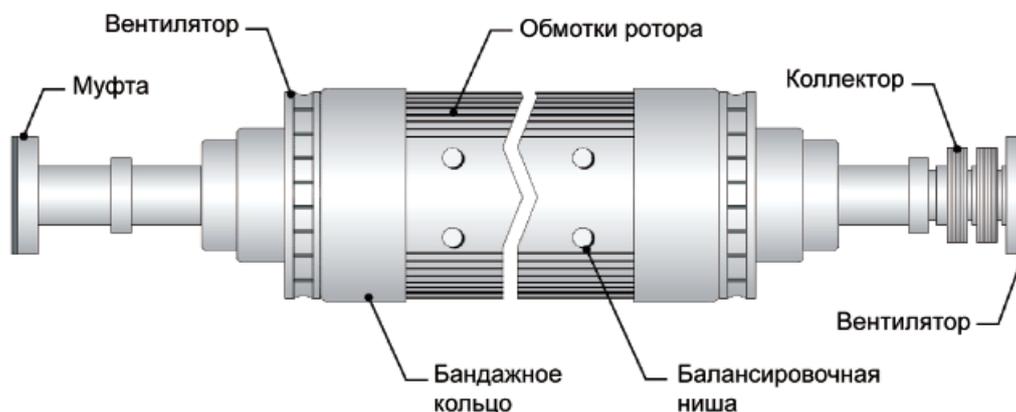


Рис. 1. Общий вид ротора турбогенератора

Ротор турбогенератора, кроме воздействия центробежных сил, испытывает большие напряжения от знакопеременных изгибающих сил, так как, несмотря на его вращение, он остается прогнутым вниз.

Для предотвращения деформации от центробежных сил лобовые части обмотки ротора закрепляют роторными бандажами. Бандажное кольцо представляет собой наиболее напряженно работающий узел ротора, так как оно испытывает центробежные усилия не только от собственной массы (около 60% от всей нагрузки), но и от лобовых частей обмотки ротора, а также усилия, вызванные посадкой бандажного кольца с натягом. Поэтому материал, из которого изготавливают бандажные кольца, должен иметь очень высокие прочностные и пластические свойства и быть немагнитным для уменьшения полей рассеяния, дополнительных потерь и местных нагревов в торцевой зоне статора. Для генераторов мощностью 30 МВт и выше бандажные кольца изготавливают из немагнитной высокопрочной хромоникельмарганцевой стали, подвергнутой сложной обработке.

Прочное крепление бандажного кольца может быть осуществлено только горячей посадкой с натягом. Натяг должен создавать плотное соединение кольца не только при номинальной частоте вращения, но и при угонной – 3600 об./мин (при эксплуатации

турбогенератора в случае внезапного сброса нагрузки частота вращения ротора может увеличиться на 20%) [3].

Масса лобовых частей обмотки ротора распределена неравномерно относительно продольной и поперечной осей ротора, отчего в кольце, кроме растягивающих усилий, возникают изгибающие моменты, стремящиеся придать бандажному кольцу овальную форму.

Разрушение бандажного кольца может привести к серьезным последствиям как для обслуживающего персонала, так и для генератора и другого оборудования (рис. 2).

#### Технологический процесс производства бандажных колец

Технологический процесс производства бандажных колец состоит из следующих операций: выплавка слитка, электрошлаковый переплав, ковка, прошивка отверстия, ковка на цилиндрической оправке, механическая обработка, закалка, холодное деформационное упрочнение, отпуск, проверка механических свойств, чистовая механическая обработка и неразрушающий контроль готового бандажного кольца.

Основное отличие в способах производства бандажных колец в различных странах относится к способу холодного деформационного упрочнения кольцевой заготовки. Для достижения требуемых величин

пределов текучести и прочности степень холодной пластической деформации кольца должна достигать 50...60%, поэтому материал кольца должен обладать достаточно высокой пластичностью в холодном состоя-

нии. Остальные технологические операции изготовления бандажных колец практически идентичны во всех странах (Германия, Франция, США, Китай).



Рис. 2. Последствия разрушения бандажного кольца

Альтернативный способ производства бандажных колец осуществляется методом раскатки кольцевой заготовки на оправке при температуре 200...500 °С. Однако предпочтение все же отдается холодному деформационному упрочнению кольцевой заготовки.

Фирма Energietechnik Essen GmbH (KRUPP, Германия) предпочитает осуществлять холодное деформационное упрочнение кольцевой заготовки механическим способом за счет расширения диаметра кольцевой заготовки на вертикальном прессе усилием 60 МН. Для расширения диаметра кольцевой заготовки используется многосекционная раздвижная обойма, расширяющаяся под действием вертикального клина.

На рис. 3 показан пресс для холодной деформации заготовки, установленный на фирме Energietechnik Essen GmbH (KRUPP, Германия).

В России (ОАО «Уралмашзавод») и Франции (фирма Creusot-Loire) упрочнение кольцевых заготовок осуществляется методом гидрорастяжения, однако только в России таким методом упрочняются крупногабаритные кольца диаметром от 316 до 1338 мм.

Метод гидрорастяжения является дальнейшим развитием процессов гидроштамповки полых деталей различного назначения. Наибольшее применение процессы гидроштамповки нашли в Германии, Японии, Великобритании и России.



Рис. 3. Пресс KRUPPa

Полученные в процессе гидрорастяжения бандажные кольца, в отличие от колец, полученных методом механического упрочнения и раскатки на оправке, отличаются более высоким уровнем прочности и однородности механических характеристик по объему бандажного кольца.

В процессе гидрорастяжения жидкость сверхвысокого давления играет роль универсального силового элемента и равно-

мерно прикладывается непосредственно к внутренней поверхности заготовки, что позволяет избегать резкой концентрации нагрузок и обеспечивает благоприятные схемы напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе деформации. При механическом же упрочнении кольцевой заготовки, а также в процессе раскатки на оправке, значительно труднее добиться равномерности механических свойств в тангенциальном направлении в связи с дискретным характером приложения нагрузки к внутренней и внешней поверхностям деформируемой заготовки.

Из сказанного следует вывод, что наиболее рациональным способом упрочнения кольцевых заготовок является метод холодного гидрорастяжения заготовок под действием внутреннего сверхвысокого давления.

#### Автоматизированная система управления процессом гидрорастяжения

Процесс гидрорастяжения осуществляется на технологическом комплексе, схема которого приведена на рис. 4. Основу комплекса составляет вертикальный гидравлический пресс усилием 300 МН. Для осуществления процесса гидрорастяжения

кольцевую заготовку устанавливают между двумя конусами  $K1$  и  $K2$ . При этом внутренняя поверхность заготовки  $BK$ , наружная поверхность оправки  $ОП$  и боковые поверхности конусов  $K1$  и  $K2$  образуют замкнутую полость, в которую во время гидрорастяжения подается жидкость сверхвысокого давления от насоса  $H2$  (производительностью 2,5...7,6 л/мин). Перемещение подвижной траверсы пресса осуществляется подачей жидкости высокого давления от насоса  $H1$  (производительностью 50...600 л/мин) в рабочие цилиндры пресса  $G1$  и  $G2$ . Управление процессом гидрорастяжения осуществляется путем изменения производительности насоса сверхвысокого давления  $H2$  и насоса высокого давления  $H1$ .

Под действием жидкости сверхвысокого давления происходит пластическая деформация заготовки, при этом конусы сжимаются усилием рабочих цилиндров пресса, обеспечивая герметичность внутренней полости. В процессе гидрорастяжения возможно появление искажения формы заготовки. Если диаметр в среднем сечении заготовки больше диаметра по краям заготовки, то имеет место искажение типа «бочка», в противном случае – искажение типа «корсет» [2].

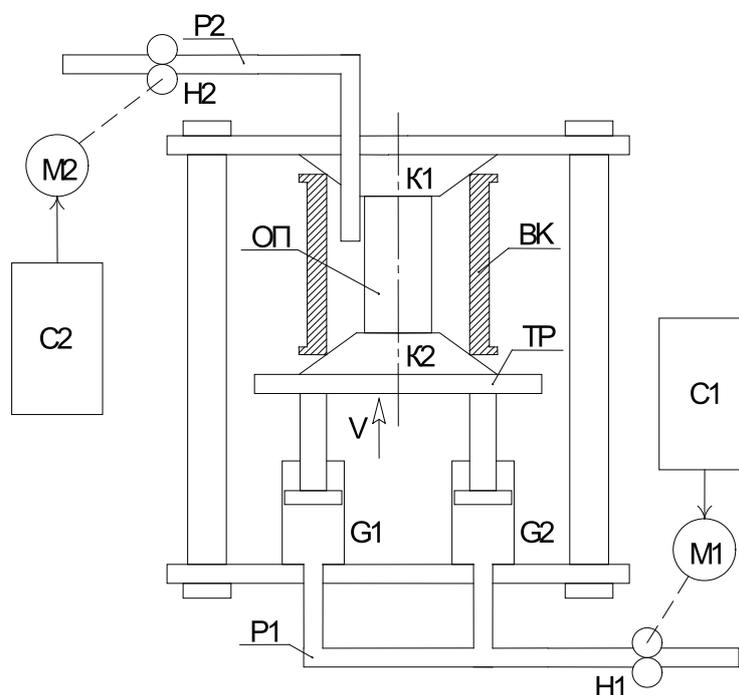


Рис. 4. Установка гидрорастяжения кольцевых заготовок:

$H1$  – насос высокого давления;  $M1$  – привод насоса  $H1$ ;  $C1$  – система управления приводом;  
 $H2$  – насос сверхвысокого давления;  $M2$  – привод насоса  $H2$ ;  $C2$  – система управления приводом;  
 $G1, G2$  – цилиндры гидропривода пресса;  $P1$  – магистраль высокого давления (0...320 кгс/);  
 $P2$  – магистраль сверхвысокого давления (500...3000 кгс/);  $BK$  – заготовка;  $K1, K2$  – конусы,  
 $TP$  – подвижная траверса пресса,  $ОП$  – оправка

Основными управляющими воздействиями на процесс гидрорастяжения являются скорость движения подвижной траверсы (с закрепленным на ней конусом) и величина сверхвысокого давления во внутренней полости кольцевой заготовки.

Целью управления процессом является обеспечение заданной степени упрочнения кольцевой заготовки при сохранении цилиндрической формы заготовки. Процесс гидрорастяжения отличается сложностью закона регулирования скоростью сближения конусов, зависимостью от начальных размеров и механических свойств заготовки, неопределенностью и непостоянством основных технологических параметров, что приводит к невозможности программного управления данным процессом.

Существующая автоматизированная система управления процессом гидрорастяжения регулирует только скорость движения

подвижной траверсы прессы и не регулирует величину сверхвысокого давления во внутренней полости заготовки. Кроме того, она не учитывает неопределенность и непостоянство основных технологических параметров процесса гидрорастяжения, связанную с работой устройств и механизмов реального оборудования.

Все вышесказанное диктует необходимость разработки ситуационной системы управления процессом гидрорастяжения в сочетании с современными, основанными на методах искусственного интеллекта, алгоритмами обработки знаний для выработки управляющих воздействий на процесс гидрорастяжения.

На рис. 5 изображена структурная схема предлагаемой автоматизированной системы управления процессом гидрорастяжения кольцевых заготовок на гидравлическом прессе усилием 300 МН.

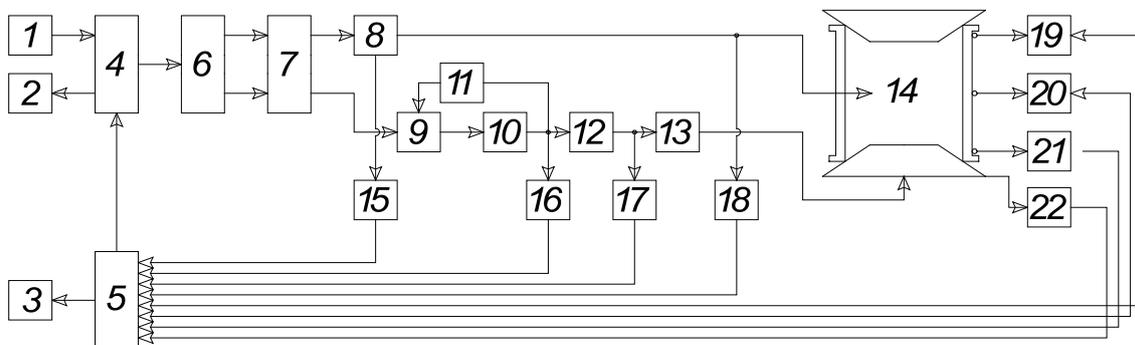


Рис. 5. Структурная схема автоматизированной системы управления процессом гидрорастяжения

В состав схемы управления (см. рис. 5) входят следующие блоки: 1 – устройство ввода информации (клавиатура); 2 – устройство вывода информации; 3 – устройство вывода информации с измерительной системы; 4 – ПЭВМ; 5 – контроллер системы измерения; 6 – модуль управления исполнительными механизмами; 7 – блок сопряжения с исполнительными устройствами; 8 – насосная станция сверхвысокого давления; 9 – тиристорный преобразователь; 10 – двигатель постоянного тока; 11 – тахогенератор; 12 – насос высокого давления; 13 – гидравлические рабочие цилиндры; 14 – объект управления – деформируемая заготовка; 15 – измеритель производительности насоса сверхвысокого давления; 16 – измеритель скорости движения подвижной траверсы прессы; 17 – измеритель высокого давления; 18 – измеритель сверхвысокого давления в полости заготовки; 19 – измеритель внешнего диаметра заготовки в верхней части; 20 – измеритель внешнего диаметра заготовки в средней части; 21 –

измеритель внешнего диаметра заготовки в нижней части; 22 – измеритель положения подвижной траверсы прессы.

Основой алгоритма автоматического управления скоростью движения траверсы и величиной сверхвысокого давления жидкости внутри полости заготовки являются методы ситуационного управления с применением методов нечеткой логики (далее нечеткий контроллер).

Основой для разработки ситуационного управления процессом гидрорастяжения является получение «знаний» и связывающих их продукционных правил, описывающих функционирование системы управления. «Знания» и продукционные правила формулируются с помощью экспертов в области управления процессом гидрорастяжения на гидравлическом прессе усилием 300 МН и после специальной обработки встраиваются в структуру нечеткого контроллера [1]. Методы нечеткой логики являются разновидностью методов искусственного интеллекта, позволяющих создавать системы

управления, способные функционировать в условиях параметрической неопределенности процесса. Поэтому для создания автоматизированной системы управления процессом гидрорастяжения применялись методы искусственного интеллекта, способные использовать «знания» экспертов для синтеза автоматизированной системы управления.

Комплексное решение проблемы автоматизированного гидрорастяжения кольцевых заготовок на гидравлическом прессе усилием 300 МН позволит улучшить качество производимых кольцевых заготовок, повысить производительность процесса и облегчить условия труда обслуживающего персонала.

### Перспектива производства бандажных колец

В настоящее время ОАО «Уралмашзавод» является единственным предприятием в России, способным производить бандажные кольца большого диаметра для установки на роторы генераторов большой единичной мощности, эксплуатируемых в энергетике. На сегодняшний день износ бандажных колец на действующих в России энергетических установках достигает 70%. В целях обеспечения энергобезопасности необходимо поддерживать и развивать производство бандажных колец, сокращать сроки их производства. Для этого требуется применять современные способы и технологии для обеспечения качественного и высокопроизводительного процесса изготовления бандажных колец. Производство качественных бандажных колец отвечает реальным потребностям современного энергомашиностроения и может стать важной статьей экспорта.

Дальнейшие научные исследования в области создания бандажных колец могут привести к качественно новым способам производства бандажных колец. Одним из перспективных способов производства бандажных колец является изготовление бандажных колец из стеклопластикового волокна путем намотки на оправку стекложгута с пропиткой в процессе намотки эпоксидным связующим.

### Выводы

1. Бандажное кольцо влияет на надежность турбогенератора;

2. Разработана ситуационная система управления процессом гидрорастяжения в сочетании с современными алгоритмами обработки данных для выработки управляющих воздействий на основе методов искусственного интеллекта;

3. Отличительные черты новой АСУ: АСУ регулирует скорость перемещения траверсы пресса и величину сверхвысокого давления жидкости во внутренней полости заготовки, а также способна функционировать в условиях параметрической неопределенности процесса.

### Список литературы

1. Вакалюк А.А. Автоматизированная система управления процессом гидрорастяжения бандажных колец большого диаметра // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: материалы Междунар. научно-техн. конф. «АПИР-15»; Вестник Тульского государственного университета; под ред. В.В. Прейса, Е.В. Давыдовой. В 2-х частях. – Ч.2. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – 280 с.
2. Готлиб Б.М., Добычин И.А., Готлиб М.Б. Автоматизированные кузнечнопрессовые комплексы (опыт создания и эксплуатации). – Екатеринбург: Изд-во Уральской государственной академии путей сообщения, 1998. – 647 с.
3. Конструкция ротора турбогенератора [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://es.mpei.ac.ru/VasinVP/konstr\\_rotora/kons\\_rotora.htm](http://es.mpei.ac.ru/VasinVP/konstr_rotora/kons_rotora.htm) (дата обращения: 03.06.2011).
4. Особенности конструкций турбогенераторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://leg.co.ua/info/elektricheskie-mashiny/osobennosti-konstrukciy-turbogeneratorov.html> (дата обращения: 03.06.2011).
5. Турбогенераторы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.motor-remont.ru/books/book1/book1p43.htm> (дата обращения: 03.06.2011).
6. Хуторецкий Г.М., Токов М.И., Толвинская Е.В. Проектирование турбогенераторов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. – 256 с.
7. Ronald J. Zawoosky, Karl C. Tornroos/ GE Generator Rotor Design, Operational Issues, and Refurbishment Options [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://site.ge-energy.com/prod\\_serv/products/tech\\_docs/en/downloads/ger4212.pdf](http://site.ge-energy.com/prod_serv/products/tech_docs/en/downloads/ger4212.pdf).

### Рецензенты:

Гребенников В.И., д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург;

Нестеров В.Л., д.т.н., профессор, директор Центра стратегического развития, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте» ФГОУ ВПО «Уральский государственный университет путей сообщения», г. Екатеринбург.

Работа поступила в редакцию 27.06.2011.