

**В. В. ШЕВЧЕНКО**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;  
**А. Н. МИНКО**, зав. сектором отдела проектирования турбогенераторов,  
ГП завод «Электротяжмаш», Харьков.

## **МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ ПОДДЕРЖАНИЯ ИХ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ**

В статье рассмотрены современные направления проведения модернизации турбогенераторов тепловых (в том числе атомных) электростанций. Предлагаемая модернизация рассмотрена для элементов и сборочных единиц неактивной зоны турбогенератора и ее предлагается проводить за счет использования современных технологий, применения новых материалов, использования современных систем охлаждения. Целью проведения работ является разработка предложений, которые смогут способствовать созданию отечественного турбогенератора, соответствующего уровню мировых стандартов.

**Ключевые слова:** турбогенератор, модернизация, неактивная зона, система охлаждения, вибрация, массогабаритные показатели

### **Введение**

При оценке путей развития мирового промышленного сектора необходимо учитывать сложный комплекс факторов – направления и приоритеты мировой экономики и промышленности, технологические, ресурсные и экологические возможности, энергетические, политические, демографические проблемы, а также вести учет взаимного влияния всех указанных факторов друг на друга. Особенно важно учесть зависимость развития энергетики и уровня экономики. Энергетика требует объединения усилий всего человечества для решения возникших проблем и определения стратегии развития. Главная задача – предотвращение экологического кризиса, стимулирование процесса перехода к энергетике нового типа. Экономическое состояние страны предполагает считать первоочередной задачей рентабельность и высокую конкурентоспособность выпускаемой продукции, ее соответствие требованиям экологичности и энергосбережению. Поэтому к перспективным направлениям развития промышленности Украины следует отнести создание современного турбогенератора (ТГ) – основного генерирующего элемента любой электростанции, а также возможного предмета экспорта Украины во многие страны мира, [1]. Такое решение позволит обеспечить энергетическую независимость страны и сохранить значимость украинской продукции на мировом рынке. На территории Украины единственный электромашиностроительный завод, выпускающий турбогенераторы, завод ГП «Электротяжмаш», находится в Харькове и, соответственно, обеспечение конкурентоспособности его продукции позволяет поддержать городской бюджет, создает рабочие места для харьковчан.

С 50-х годов прошлого века единичная мощность ТГ возросла в 7÷7,5 раз, от 200 до 1500 МВт. При этом произошло увеличение габаритов и массы

© В. В. Шевченко, А. Н. Минко, 2014

ТГ, что создало проблему их перевозки по железной дороге и определило задачу минимизации их объема и веса при возрастающей мощности, [1, 2]. Прогноз развития турбогенераторостроения определяется потребностями электроэнергетики, базируется на проблемах создания энергетических блоков, развивается в соответствии с достижениями различных сопредельных отраслей промышленности. Сверхмощные энергетические блоки необходимы для ТЭС, как на органическом топливе, так и особенно для АЭС с реакторами на тепловых и быстрых нейтронах. При этом мощность ТГ можно увеличивать за счет интенсификации их работы, [2]:

- интенсификация процессов охлаждения обмоток статора и ротора, сердечника статора и конструктивных элементов машин;
- использование лучших электроизоляционных материалов, а также электротехнических сталей и поковок с более высокими магнитными и прочностными характеристиками;
- применение новых видов материалов для крепления обмоток как в пазовой, так и в лобовых частях;
- проведение ресурсных исследований материалов и конструктивных узлов для сооружения высоконадежных машин;
- изучения режимов работы сверхмощных ТГ в энергосистемах при нормальных и аварийных условиях и т.д.

Разработка высокоэффективных ТГ возможна только на основе комплексного решения научных проблем, связанных, как непосредственно с машиной, так и с системами возбуждения, регулирования, контроля и защиты, применения новых материалов и технологий. Перспективно внедрение новых типов генераторов: генераторов асинхронизированного типа; генераторов, созданных с использованием высокотемпературных сверхпроводников, что позволит уменьшить массу и габаритные размеры ТГ, увеличить их предельную мощность и КПД, и т.д., [2, 3].

#### **Анализ основных достижений**

Отечественные ТГ по конструкции соответствуют мировым достижениям, но имеют собственную историю и конструктивные особенности, не имеющие мировых аналогов и позволяющие превзойти продукцию конкурентов по главным технико-эксплуатационным показателям: уровню нагрева и организации системы охлаждения, КПД, маневренности, перегрузочной способности, надежности.

Для турбогенераторов необходимо вести исследования в следующих направлениях, [2-4]:

- 1) оптимизация конструкции торцевых зон сердечника статора, совершенствование его крепления в корпусе машины, крепления обмотки статора в пазовой и лобовой частях;
- 2) применение современных систем изоляции для статорных обмоток ТГ, оценка возможности создания высоковольтных ТГ и ТГ повышенной мощности;
- 3) разработка современных моделей оптимизации массогабаритных параметров турбогенераторов и уточнение методов их применения;

4) замена водородного охлаждения в мощных турбогенераторах на воздушное, [4, 6];

5) внедрение современной системы диагностики для оценки теплового и вибрационного состояния ТГ в период плановых ремонтов и в режиме *on-line*;

6) повышение устойчивости работы ТГ при его работе на энергосистему с переменными эксплуатационными характеристиками; обеспечение повышенной маневренности по выработке активной и реактивной энергии с возможностью глубокого потребления последней из электросети. Последнее возможно при работе турбогенераторов АЭС с повышенными значениями коэффициентов мощности (до 0,994–0,999).

В отечественных ТГ конструктивное исполнение торцевых зон сердечника статора характеризуется повышенной механической прочностью и интенсивным охлаждением. Однако при промышленной эксплуатации часто наблюдаются механические разрушения отдельных элементов: наблюдается значительное нагревание конечных пакетов сердечника статора с растущими в таких режимах механическими усилиями, что способствует распушиванию торцевых пакетов. Несовершенны старые конструкции крепления лобовых частей обмоток статоров шнурами и недостаточно надежны материалы, которые применяются для этой цели, в том числе прокладочные, что приводит к ослаблению креплений, избыточной вибрации стержней и, в окончательном итоге, к возможным замыканиям обмотки в пазах статора. Вибрации стержней обмоток в лобовых и пазовых частях вызывают нарушение герметичности трактов водяного охлаждения, что приводит к авариям, [5]. Также в таких ТГ необходимо ограничивать скорость нарастания тока статора, т.к. разность температур в стали сердечника и меди обмотки ротора может стать достаточно большой, что при значительной длине активных частей ТГ приведет к существенной разнице теплового расширения обмоток и стальных сердечников и, как следствие, к перемещению обмоток в пазу. Эти перемещения или чрезмерные усилия в меди при частых повторениях могут вызвать повреждение изоляции, деформацию меди, к появлению механических напряжений в обмотках ротора, превышающих предел ее текучести. Эти проблемы являются общемировыми и каждая электромашиностроительная фирма занимается их решением. Однако есть вопросы, не связанные с классическими проблемами турбогенеростроения, но которые являются препятствием при проведении тендера продукции на мировых аукционах. Эта проблема – высокие показатели веса отечественных машин.

#### **Цель исследований**

Массогабаритная оптимизация конструкции отечественных ТГ на примере оптимизации конструкции корпуса статора ТГ с воздушным охлаждением.

#### **Материалы исследований**

К числу ограничений, которые необходимо соблюдать при проектировании, наряду с максимально допустимыми механическими и электрическими нагрузками, величиной допустимых температур активных

элементов конструкций и возможностью осуществления технологических операций, относятся требования снижения массогабаритных параметров конструкций, которые характеризуют эффективность геометрии машины, степень рациональности выбора и использования конструкционных материалов, трудоемкость технологических операций. Проведенный анализ показал, что отечественные ТГ уступают по массогабаритным параметрам практически всем мировым фирмам. И особенно остро стоит вопрос оптимизации параметров неактивной зоны ТГ.

Неактивная часть ТГ – элементы конструкции, основной функцией которой являются не электромагнитные процессы, а задачи механического крепления и формирования системы охлаждения: корпус статора, короба, газоохладителей, подшипниковый узел, щиты, кожухи, трубопроводы и т.д. Этот вопрос стал достаточно актуальным, т.к. одним из определяющих показателей при проведении международных тендеров на поставку ТГ является их удельный вес (кг/кВт). И при расчете этого показателя весьма значимым (до 30 % от общего веса) является вклад веса неактивной зоны.

Рассмотрим вопрос оптимизации массогабаритных параметров статора ТГ с воздушной системой охлаждения на основании анализа конструкции его корпуса. Рассмотрение конструкции ТГ с воздушным охлаждением соответствует современным тенденциям совершенствования ТГ. Возможны и другие решения. Например, для снижения массогабаритных параметров концевой зоны корпуса статора, трудоемкости монтажа нажимного фланца и крепления лобовых частей обмотки статора возможно использование силового аккумулятора в межкорпусной части.

Корпус статора, представленный на рис. 1, состоит из поперечных стенок с вентиляционными окнами, к ним приварены четыре продольных бруса, к торцам которых приварены фланцы для крепления торцевых коробов (или щитов). Между поперечными стенками установлены стяжные ребра, к которым равномерно по окружности приварены призмы. На боковых продольных брусках установлены кантовочные устройства (цапфы), и прикреплены опорные лапы, которые представляют собой упругий элемент, в нижней части которых предусмотрены отверстия для установки фундаментных шпилек. К продольным брускам, торцам поперечных стенок и к одной из сторон стяжных ребер сваркой крепится обшивка статора. К нижнему продольному брусу для транспортировки, монтажа и подготовки к ремонту приваривают технологические лапы. К поперечным стенкам и стяжным ребрам при помощи сварки под обшивкой установлены обечайки, которые разделяют потоки горячего и холодного воздуха.

Анализа технических требований и условия проектирования, а так же многолетний опыт ГП завода «Электротяжмаш» позволяет сделать вывод, что проведение оптимизации массогабаритных параметров корпуса статора ТГ может идти в следующих направлениях, [1, 2]:

1) оптимизация элементов конструкции корпуса возможна при уменьшении площади их сечения;

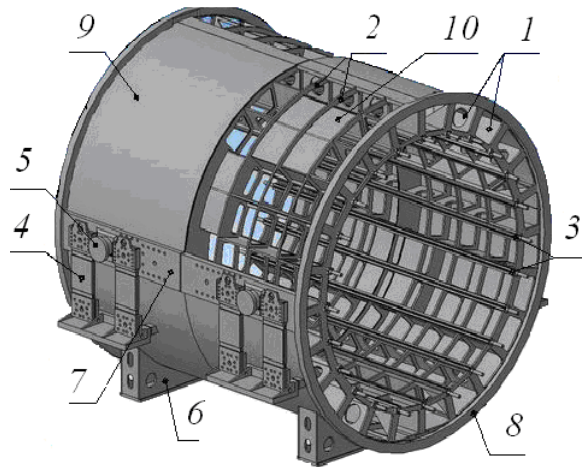


Рис. 1 – Корпус статора турбогенератора с воздушной системой охлаждения  
 1 – стяжные ребра; 2 – поперечные стенки; 3 – стяжные призмы;  
 4 – опорные лапы; 5 – не кантовочная цапфа; 6 – технологические лапы;  
 7 – силовой брус; 8 – основной фланец; 9 – обшивка; 10 – обечайка.

2) снижение рабочих габаритов сборочных узлов осуществляется с обеспечением сохранения механической надежности конструкции и сохранением трудоемкости производственных и монтажных работ;

3) при замене материала деталей необходимо вести контроль стоимости заменяемого материала и проводить сравнение его стоимости со стоимостью заменяемого материала;

4) оптимизацию конструкции корпуса следует производить в сочетании с оптимальным использованием активной зоны ТГ, обеспечением унификации его сборочных узлов и интенсификацией охлаждения;

5) массогабаритную оптимизацию устройств и узлов, не принимающих участия в основном эксплуатационном режиме, которые используются в монтажных, наладочных, транспортировочных целях, следует выполнять съемными и не вносить их в массогабаритную характеристику ТГ. Оптимизацию кантовочного устройства корпуса статора необходимо осуществлять в сочетании с эффективным сопряжением с продольным силовым бруском, а также с отнесением кантовочного устройства к разряду технологических приспособлений, которые в массогабаритную характеристику турбогенератора не входят;

6) выполнять компактное пространственное сопряжение нажимного фланца с нажимным устройством, и кронштейна с закрепленными на нем лобовыми частями обмотки статора.

Предлагаем ряд геометрических изменений базовой конструкции, ТГ с воздушной системой охлаждения мощностью 300 МВт, [1, 7]:

1) уменьшить общую площадь сечения стяжных ребер корпуса статора от 30 до 22 мм; толщину поперечных рам от 30 до 20 мм. Поперечные рамы устанавливать вдоль оси генератора с интервалом около 400 мм. Возможно уменьшение толщины наружной обшивки и внутренних обечеек от 18 мм до 12 мм, площади поперечного сечения продольных брусьев от 420×70 мм до 300×60 мм;

2) уменьшить геометрию наружных лап. Базовая конструкция наружных опорных лап (рис. 2, а) имеет следующие геометрические размеры: на уровне нижней плиты 1100×370×120 мм, верхней плиты - 1100×300×70 мм, ширина пружинного элемента 300 мм. Предлагаемая конструкция наружных опорных лап (рис. 2, б), имеет размеры: на уровне нижней плиты 985×370×60 мм без их установки на уровне верхней плиты;

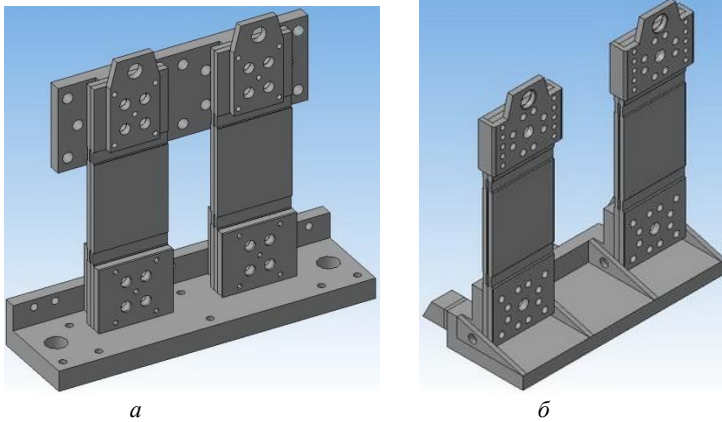


Рис. 2 – Наружные опорные лапы корпуса статора:  
а – базовая модель; б – предлагаемая модель (после оптимизации)

3) в оптимизированном корпусе статора выполнять кантовочное устройство съемным и делать совместные крепежные отверстия для наружных лап, рис. 3;

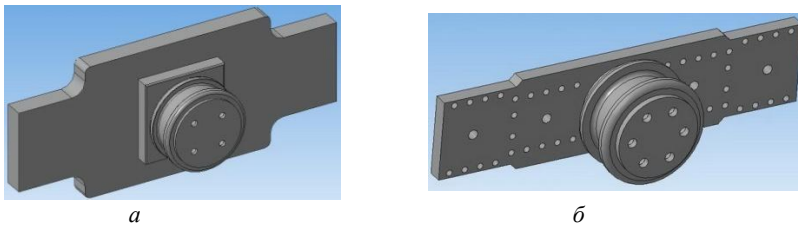


Рис. 3 – Кантовочное устройство корпуса статора:  
а – базовая модель; б – предлагаемая модель (после оптимизации).

4) возможно исключение из конструкции корпуса статора поддонных лапок, объем которых составляет  $5,66 \text{ м}^3$ , а масса 443 кг. Предлагаем выполнять их съемными, объемом  $1,98 \text{ м}^3$  и массой 155 кг, без изменения опорной поверхности лапы. Крепление лап съемной конструкции к нижнему продольному брусу проводить болтами через специальные уголки, которые, в свою очередь, крепить к обшивке и поперечным рамам корпуса статора сваркой;

5) уменьшение радиального и тангенциального размера концевой части корпуса статора возможно за счет изменения конструкции нажимного устройства и оптимизации сопряжения нажимного фланца и кронштейна с закрепленными на нем лобовыми частями обмотки статора. В предлагаемой конструкции нажимным устройством сердечника статора в исследуемой модели корпуса является силовой аккумулятор, который представлен на рис. 4.

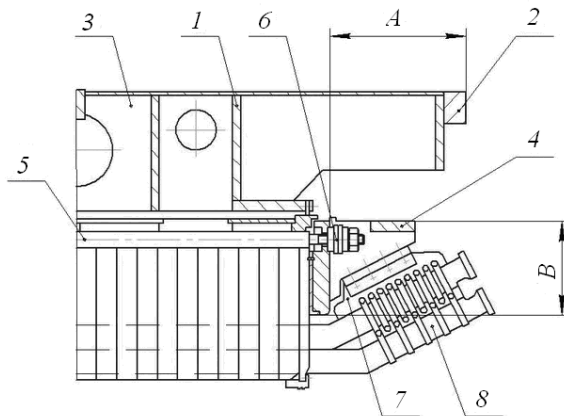


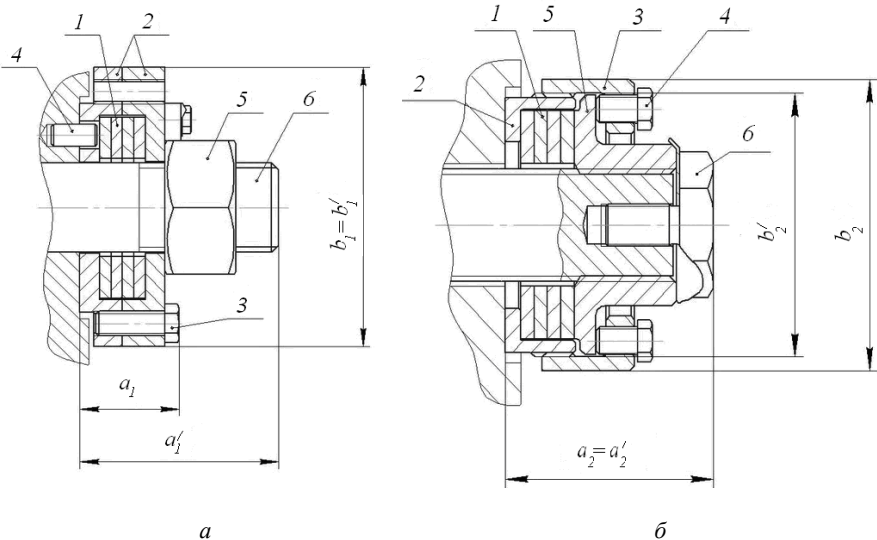
Рис. 4 – Концевая часть корпуса статора с сечением по месту установки силового аккумулятора

1 – крайняя рама корпуса, 2 – фланец, 3 – стяжные ребра, 4 – нажимной фланец, 5 – стяжная призма, 6 – силовой аккумулятор, 7 – кронштейн, 8 – лобовая часть обмотки.

Уменьшение размера  $A$  (рис. 4) приведет к сокращению тангенциальной длины корпуса статора, к снижению массы и габаритов корпуса. Минимизация радиального размера  $B$  позволит снизить массу и габариты нажимного фланца, упростит конструкцию кронштейна и снизит трудоемкость монтажных работ данного узла (за счет отсутствия необходимости дополнительной механической обработки нажимного фланца при установке силового аккумулятора).

На рис. 5, *а* представлена конструкция ранее применяемого силового аккумулятора, на рис. 5, *б* – предлагаемая конструкция. После установки

аккумуляторов на стяжные призмы и стопорения силовой гайки, возможно удалить стяжные болты, при этом усилие от пружинных элементов передается через нажимной фланец запрессованному сердечнику статора, освобождая аккумулированную механическую энергию. После удаления стяжных болтов и наружного стакана уменьшается радиальный размер аккумулятора; а за счет применения оригинальной конструкции специальной гайки и специального болта снижается его тангенциальный размер.



**а** **б**

Рис. 5 – Силовой аккумулятор турбогенератора:

**а** – базовая модель

**б** – предлагаемая модель

- 1–обоймы пружинных элементов;
- 2–внутренний стакан; 3–наружный стакан; 4–стяжные болты;
- 5–специальная силовая гайка;
- 6–специальный стопорный болт

- 1–обоймы пружинных элементов;
- 2–два стакана; 3–стяжные болты;
- 4–стопорный винт; 5–силовая гайка;
- 6–стяжная призма

На рис. 5, *а, б* приняты условные обозначения:

*a* – тангенциальный установочный размер силового аккумулятора, мм;

*a'* – тангенциальный размер силового аккумулятора в рабочем режиме, мм;

*b* – радиальный установочный размер силового аккумулятора, мм;

*b'* – радиальный размер силового аккумулятора в рабочем режиме, мм;

Индекс «1» – соответствует базовой модели (до оптимизации), индекс «2» – предлагаемой модели (после оптимизации).

Массогабаритная оптимизация концевой части корпуса статора, за счет оптимизации конструкции предлагаемого силового аккумулятора, проводится на основании сравнительного анализа геометрии конструкции.



На момент установки аккумулятора  $a_1 < a_2$  и  $b_1 > b_2$ . В рабочем (длительно-допустимом) режиме получаем:

- 1) если  $a_2 = a_2'$ , то  $a_1' > a_1 > a_2'$ ;
- 2) если  $b_1 = b_1'$ , то  $b_1' > b_2 > b_2'$ .

На рис. 4 представлены  $A$  – тангенциальный размер концевой части корпуса статора,  $B$  – радиальный размер нажимного фланца сердечника статора. Эти размеры имеют линейную зависимость:  $A = f(a_1)$ ;  $B = f(b_1)$ , тогда в рабочем режиме  $A_1 = f(a_1')$  и  $B_1 = f(b_1')$ .

В рабочем режиме  $f(a_1') > f(a_2')$  и  $f(b_1') > f(b_2')$ . Отсюда следует, что величина, характеризующая тангенциальный размер концевой части корпуса статора во втором случае меньше:  $A_2 < A_1$ . Аналогично, величина, характеризующая радиальный размер нажимного фланца, при модернизации меньше, чем у базового варианта:  $B_2 < B_1$ .

Проведенный комплекс мероприятий позволит сократить массу корпуса статора приметно на 18–22 % и уменьшить его рабочие габариты на 16–18 % по сравнению с базовой моделью. При этом возможно решение вопроса увеличения мощности до 20 %.

## Выводы

1) При проведении оптимизации массогабаритных параметров ТГ целесообразно особое внимание уделять оптимизации конструкции его неактивной зоны.

2) Модернизация силового аккумулятора значительно снизит показатели массы и габаритов концевых частей конструкции корпуса статора и всей машины в целом.

3) Применение эффективных конструкций и способов компоновки сборочных единиц, современных технологических устройств в конструкции корпуса статора, снижает его массогабаритные показатели.

**Список литературы:** 1. Кузьмин В.В., Шевченко В.В., Минко А.Н. Оптимизация массогабаритных параметров неактивных частей турбогенераторов: монография. – Харьков: Монограф. - 2012. – 246 с. 2. Шевченко В.В. Оценка технической и экологической перспективы развития энергетики Украины // Качество технологий и образования. Сборник научных трудов. - Вып. 2. – Харьков: УИПА. - 2011. - С. 19-25. 3. Минко А.Н., Гордиенко В.Ю. Турбогенераторы с оптимальными массогабаритными параметрами взамен отработавших свой ресурс без разрушения исходного фундамента // Энергетика та електрифікація. – 2011. – № 6. – С. 37-42. 4. Шевченко В.В. Системный подход к вопросам оценки технического состояния электрооборудования энергосистем Украины // Электрика (Россия). – 2013. – № 1. – С. 6 – 11. 5. Титко А.И. Оценка состояния статора турбогенератора по показаниям штатных вибродатчиков / А.И. Титко, В.Л. Ахременко, В.А. Титко // Энергетика та електрифікація. – К.: 2011. – № 1(329). – С. 36 – 40. 6. Шевченко В.В. Основные задачи, проблемы и направления развития отечественного турбогенераторостроения // Энергетика та електрифікація. - № 10. - 2012. - С. 33-39. 7. Шевченко В.В. Пути повышения мощности турбогенераторов при проведении работ по их реабилитации // Системи обробки інформації. Збірник наукових праць. Харківський університет повітряних сил. – 2012 - Вип. 7(105). - С. 152-155.

**Bibliography (transliterated):** 1. Kuz'min V.V., Shevchenko V.V., Minko A.N. Optimizacija massogabaritnyh parametrov neaktivnyh chastej turbogeneratorov: monografija. – Charkov: Monograf. - 2012. – 246 P. [Print]. 2. Shevchenko V.V. Ocenka tehnicheskoj i jekologicheskoj perspektivy razvitija jenergetiki Ukrainy. Kachestvo tehnologij i obrazovanija. Sbornik nauchnyh trudov. - No 2. – Har'kov:

UIPA. - 2011. - P. 19-25. [Print]. 3. Minko A.N., Gordienko V.Ju. Turbogeneratory s optimal'nymi massogabaritnymi parametrami vzamen otrabotavshih svoj resurs bez razrushenija ishodnogo fundamenta. Energetika ta elektrifikacija. – 2011. – No 6. – P. 37-42. [Print]. 4. Shevchenko V.V. Sistemnyj podhod k voprosam ocenki tehničeskogo sostojanija jelektrooborudovanija jenergosistem Ukrainy. Jelektrika (Rossija). – 2013. – No 1. – P. 6 – 11. [Print]. 5. Titko A.I. Ocenka sostojanija statora turbogeneratora po pokazanijam shtatnyh vibrodatchikov. A.I. Titko, V.L. Ahremenko, V.A. Titko. Energetika ta elektrifikacija. – K.: 2011. – No 1(329). – P. 36 – 40. [Print]. 6. Shevchenko V.V. Osnovnye zadachi, problemy i napravlenija razvitija otečestvennogo turbogeneratorostroenija. Energetika ta elektrifikacija. - No 10. - 2012. - P. 33-39. [Print]. 7. Shevchenko V.V. Puti povyšhenija moshhnosti turbogeneratorov pri provedenii rabot po ih rehabilitacii. Sistemi obrobki informacii. Zbirk naukovih prac'. Harkivs'kij universitet povitrtjanih sil. – 2012 - Vip. 7(105). - P. 152-155. [Print].

*Надійшла (received) 01.09.2014*



Шевченко Валентина Владимировна  
канд. техн. наук, доцент  
доцент каф. електрических машин, НТУ «ХПИ»  
e-mail: zurbagan\_@mail.ru



Минко Александр Николаевич  
зав. сектором отдела проектирования турбогенераторов,  
ГП з-д «Электротяжмаш», Харьков