

Базовая модель стоимости жизненного цикла энергетического оборудования

© А.Е. Бром¹, О.В. Белова¹, А. Сиссиньо²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

²Миланский технический университет, Милан, Италия

Приведен базовый подход по оценке стоимости жизненного цикла для энергетического оборудования, даны рекомендации по его применению для энергетических компаний. Особенности энергетической отрасли являются высокая стоимость оборудования и относительно большой срок службы. Поэтому при планировании деятельности компаниям необходимо выстраивать грамотную PLM-стратегию, учитывающую экономическую оценку для действующего парка оборудования и оценку стоимости технического перевооружения и закупки новых агрегатов.

Ключевые слова: стоимость жизненного цикла, энергетическое оборудование, PLM-стратегия, надежность, безотказность, затраты приобретения и владения, техническое обслуживание.

Для энергетических компаний первостепенное значение имеет экономический фактор. Энергетическое оборудование стоит дорого и эксплуатируется десятилетиями, поэтому при управлении таким бизнесом наиболее остро стоит вопрос о планировании работы с учетом текущего состояния парка оборудования и /или принятии решения о техническом перевооружении и закупке новых агрегатов.

Методика расчета стоимости жизненного цикла для наукоемкой продукции. Один из важных потребительских параметров сложного наукоемкого изделия — стоимость жизненного цикла — СЖЦ (Life Cycle Cost, LCC). Полная СЖЦ складывается из затрат на разработку и производство изделия, а также на ввод изделия в действие, эксплуатацию и поддержание в работоспособном состоянии. При расчете СЖЦ для новых моделей техники необходимо учитывать затраты на освоение новой техники у эксплуатантов продукции: затраты на повышение квалификации и переобучение рабочих, занятых на технологических операциях с новым оборудованием; потери, связанные со снижением плановой прибыли в период освоения новой техники.

Высокая технологическая сложность изделия приводит к тому, что 80—90% производственных и эксплуатационных затрат определяются именно на стадии НИОКР. Таким образом, важнейший принцип концепции LCC можно определить как «прогноз и управление расходами на производство и эксплуатацию изделия на стадии его проектирования».

Контроль и сокращение СЖЦ изделия заложены и в концепцию PLM (Product Life Management) — методологию, обеспечивающую управление всей информацией об изделии, процессах его жизненного цикла (ЖЦ) и бизнес-процессах компании-производителя. Специфика PLM-стратегии для энергетических компаний заключается в учете спроса на электроэнергию. Энергетика — это бизнес. Как любой вид бизнеса, она должна быть прибыльной, поэтому PLM-стратегия является частью корпоративной стратегии, и ее внедрение должно повышать эффективность деятельности компании (рис. 1 и 2).

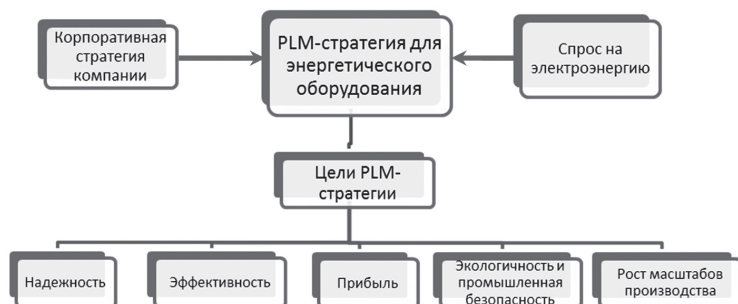


Рис. 1. Цели PLM-стратегии для энергетических компаний

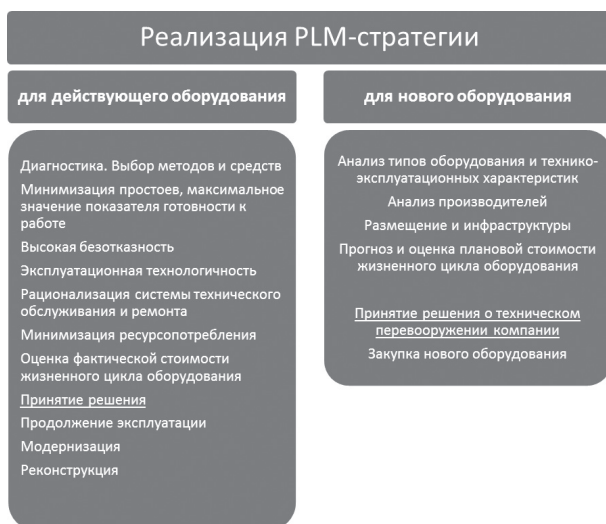


Рис. 2. Основные процедуры, необходимые для реализации PLM-стратегии

Можно выделить типичные для большинства производителей проблемы и конфликты при попытках оптимизации СЖЦ изделия.

1. Конструкторы и разработчики хотят видеть в качестве единственного критерия минимизацию капитальных затрат.

2. Эксплуатанты продукции хотят в качестве единственного критерия минимизировать время ремонта (или максимизировать продолжительность работы изделия).

3. Проектировщики и специалисты по надежности в качестве единственного критерия хотят избежать внезапных отказов оборудования.

4. Экономисты и финансисты рассматривают как единственный критерий максимизацию чистой проектной стоимости.

5. Акционеры заинтересованы видеть единственным критерием рост акционерного капитала и дивидендов.

Согласование этих потенциальных конфликтов необходимо для достижения низкой долгосрочной стоимости ЖЦ изделия. Поэтому расчет СЖЦ может использоваться в качестве инструмента управленческого решения для согласования производственных и постпродажных конфликтов, так как СЖЦ сосредоточена на фактических данных о стоимости процессов и затрачиваемом на их исполнение времени.

Для сложного изделия, имеющего длительный срок использования (не менее 10—20 лет), затраты, возникающие на постпроизводственных стадиях ЖЦ и связанные с поддержанием изделия в работоспособном состоянии, могут быть равны или превышать в несколько раз затраты на приобретение.

Поэтому именно этапу эксплуатации в последнее время уделяется самое пристальное внимание. Этап эксплуатации выделяется из послепродажного этапа ЖЦ и представляет собой совокупность процессов производителей моделей техники и запасных частей (ЗЧ) к ней, поставщиков, субпоставщиков и эксплуатантов продукции. Данный этап состоит из системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) и материально-технического обеспечения (МТО) [1].

Расчет СЖЦ изделия позволяет определить затраты на:

- предварительное и концептуальное проектирование;
- разработку и проектирование системы;
- изготовление (себестоимость изделия);
- обслуживание и утилизацию.

При таких расчетах часто используют параметры, полученные при анализе надежности технической системы и составляющих узлов и агрегатов: интенсивность отказов, стоимость запасных частей, продолжительность ремонта, стоимость комплектующих и т.д.

Естественно, что на изготовление наукоемкой продукции высокого качества с высокими количественными показателями надежности требуются большие затраты, которые потребитель не готов возместить. Но, обеспечивая высокую надежность (безотказность и долговечность) изделия, изготовитель не только повыша-

ет его привлекательность в глазах потенциального заказчика (поскольку эти показатели — важнейшие параметры качества объектов техники), но и добивается существенного снижения эксплуатационных затрат.

Чем выше безотказность, т.е. чем больше наработка изделия на отказ (до отказа), тем реже приходится его ремонтировать, и, следовательно, меньше затраты на поддержание изделия в работоспособном состоянии. Обеспечение ремонтпригодности и эксплуатационной технологичности производителями техники напрямую связано с потенциальными затратами трудовых и материальных ресурсов у будущих эксплуатантов, т.е. с затратами на производственных стадиях ЖЦ.

Поэтому необходимо обеспечить оптимальное соотношение между качеством и надежностью техники, с одной стороны, и стоимостью ее приобретения и владения — с другой.

Решение задачи обеспечения надежности техники связано с учетом множества разнообразных и часто противоречивых факторов. На первом месте стоят вопросы эффективности продукции, на втором — экономические показатели (причем затраты эксплуатационного этапа для потребителя имеют первостепенное значение, т.е. обеспечение надежности на этом этапе и организация эффективной системы ТОиР влечет дополнительные расходы для производителя), на третьем — необходимость учитывать реальные технологические возможности и производственные мощности, на четвертом — реальные условия, режимы и стратегии эксплуатации. Требования к надежности сложной техники связаны с необходимостью финансовых вложений на этапах проектирования, производства и эксплуатации ЖЦ изделия, вызванных изменением надежности оборудования [2].

Аналитическое решение задачи обоснования требований к надежности энергетического оборудования представляет собой решение оптимизационной задачи, где критерием является минимизация затрат, связанных с обеспечением надежности объекта. Например, для энергетического оборудования в общей постановке целевая функция будет выглядеть следующим образом:

$$\sum_{i=1}^N Z_i(P_i) + Z_{рез}(P_i, \Pi_э) + Z_y(\Pi_э) + Z_{эк}(P_i) \Rightarrow \min,$$

где $Z_i(P_i)$ — приведенные затраты на основное энергетическое оборудование, зависящие от уровня его надежности; $Z_{рез}(P_i, \Pi_э)$ — затраты на создание резерва мощности в энергосистеме, которые зависят как от характеристик надежности основного оборудования $P_i, i = 1, \dots, N$, так и от расчетного уровня надежности энергоснабжения потребителей $\Pi_э$; $Z_y(\Pi_э)$ — ущерб от неотпуска энергии

потребителям (штрафные санкции); $Z_{\text{эк}}(P_i)$ — затраты на ликвидацию возможных последствий ненадежности оборудования экологического характера.

Но решить эту задачу «в лоб» довольно проблематично, что хорошо видно на рис. 3.

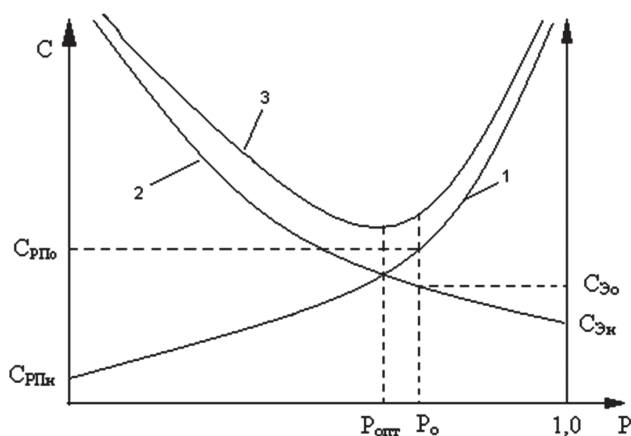


Рис. 3. Зависимость суммарной стоимости объекта от его надежности

Увеличить показатели надежности оборудования можно благодаря бóльшим вложениям на этапах разработки и производства, т.е. затраты увеличиваются по мере возрастания надежности. При изменении величины вероятности безотказной работы (ВБР) в промежутке от 0,2 до 0,8 увеличение затрат идет плавно, а в промежутке от 0,8 до 1,0 — резко возрастает и стремится к бесконечности при $P(t) = 1,0$ (рис. 3, график 1). Этот график может быть аппроксимирован зависимостью вида:

$$Z_{\text{Р.П.}}(P) = Z_{\text{Р.П. const}} + Z_{\text{Р.П.}} \frac{\ln(1-P)}{\ln(1-P_0)},$$

где $Z_{\text{Р.П. const}}$ — постоянная величина стоимости объекта, не зависящая от надежности; $Z_{\text{Р.П.}}$ — стоимость проектирования и производства объекта, обладающего ВБР, P_0 .

Естественно, что оборудование с низкими показателями надежности дорого обходится при эксплуатации, так как необходимо постоянно проводить плановые профилактические ремонты (ППР), диагностику, осмотры с целью отыскания, предупреждения и устранения отказов. Это, в свою очередь, требует затрат на содержание квалифицированного обслуживающего персонала, хранения большого запаса комплектующих, наличия диагностической, контрольно-измерительной аппаратуры. Низкая надежность техники на эксплуатационном этапе — это невысокие затраты приобретения, но всегда большие затраты владения объектом, которых избегает потребитель. При увеличении надежности объекта

возрастают затраты приобретения, но снижаются затраты эксплуатационного этапа. Таким образом, стоимость объекта на этапе эксплуатации, т.е. затраты владения, находится в зависимости от его надежности, которую можно описать следующим графиком (рис. 3, график 2). Этот график может быть аппроксимирован зависимостью вида:

$$Z_{\Theta}(P) = Z_{\Theta.\text{const}} + Z_{\Theta_0} \frac{\ln(P)}{\ln(P_0)},$$

где $Z_{\Theta.\text{const}}$ — постоянная величина, не зависящая от надежности; Z_{Θ_0} — стоимость объекта в эксплуатации (затраты владения), обладающего ВБР, в течение планового периода эксплуатации.

Таким образом, можно выразить общую стоимость затрат на разработку, производство и эксплуатацию энергооборудования:

$$Z_{\Sigma} = Z_{\text{РП}}(P) + Z_{\Theta}(P) = Z_{\text{РП.конст}} + Z_{\text{РП}_0} \frac{\ln(1-P)}{\ln(1-P_0)} + Z_{\Theta.\text{const}} + Z_{\Theta_0} \frac{\ln P}{\ln P_0}.$$

Получается результирующая кривая зависимости суммарной стоимости объекта от его надежности (рис. 3, график 3). Из рисунка видно, что суммарная стоимость системы имеет минимум при некотором определенном значении величины ВБР, которая и будет являться *оптимальной величиной надежности объекта по его стоимости* $P_{\text{опт}}$. Для вычисления $P_{\text{опт}}$ надо продифференцировать выражения и решить уравнение:

$$\frac{\partial Z_{\Sigma}(P)}{\partial P} = 0.$$

Тогда величина $P_{\text{опт}}$ равна:

$$P_{\text{опт}} = \frac{Z_{\Theta_0}}{Z_{\Theta_0} - Z_{\text{Р.П.о}} \frac{\ln P_0}{\ln(1-P_0)}}.$$

Производители добиваются оптимизации суммарной стоимости изделия за счет сокращения материальных затрат и сроков создания изделия, снижения расходов эксплуатационного этапа и эффективной организации системы ТОиР и материального снабжения (МТС).

Рациональная организация процессов ТОиР и МТС может существенно сократить долю затрат на владение техникой в СЖЦ изделия. Так, например, существует очевидная зависимость между периодичностью регламентных работ и затратами. Если регламентные работы проводить слишком часто, то затраты на них могут превысить издержки, связанные с простоями по причине отказов. С другой стороны, если регламентные работы проводить редко,

то это влечет возрастание вероятности отказа и, как следствие, рост издержек, обусловленных простоями. Таким образом, возникает задача выбора оптимальной периодичности регламентных (профилактических) работ по критерию минимума суммарных издержек (затраты на регламентные работы + издержки от простоев).

Плановая стоимость ЖЦ изделия в общем случае определяется по формуле:

$$СЖЦ = Z_{\text{приобр}} + Z_{\text{владения}},$$

где $Z_{\text{приобр}}$ — (единовременные затраты), цена приобретения технического средства заявленная поставщиком (производителем) изделия; $Z_{\text{владения}}$ — совокупные издержки на эксплуатацию изделия за срок его службы (расчетный период).

Подробно группы затрат представлены на рис. 4 и 5.

Для отражения влияния процессов технического и ремонтного обслуживания на СЖЦ для энергетического оборудования предлагаем использовать следующую базовую модель для расчета:

$$СЖЦ = Z_{\text{приобр}} + \sum_{t=1}^T (Z_{\text{экспл}} + Z_{\text{ТО}} + Z_{\text{план}}^P + Z_{\text{внепл}}^P) + Z_{\text{утилизация}},$$

где $Z_{\text{экспл}}$ — среднегодовые затраты на эксплуатацию; $Z_{\text{ТОиР}}$ — среднегодовые затраты на техническое обслуживание и ремонты; $Z_{\text{план}}$ — затраты на плановые ремонты; $Z_{\text{внепл}}$ — затраты на внеплановые ремонты; t — текущий год эксплуатации; T — конечный год эксплуатации, который устанавливается в соответствии с техническими требованиями или иной документацией (в том числе учетной политикой предприятия, на балансе которого числится объект).

В качестве шага расчета для энергооборудования можно принимать один год. Расчетный период (горизонт расчета) принимается в зависимости от срока службы технического средства.

Затраты $Z_{\text{экспл}}$ на эксплуатацию изделия включают затраты на расходные материалы, необходимые в процессе эксплуатации, инфраструктуру материально-технического снабжения (склад, транспорт), а также затраты на содержание обслуживающего персонала, на системы диагностики и мониторинга.

Таким образом, для точного расчета этой группы затрат необходимо знать:

- вид, цену и количество ресурсов и материалов, потребляемых в единицу времени, необходимых для функционирования технического средства;

- трудоемкость работы с техническим средством (в человеко-часах), количество эксплуатирующего персонала и часовую тарифную ставку;

- затраты на средства диагностики, внедрение АСУ, мониторинг технического состояния изделия.

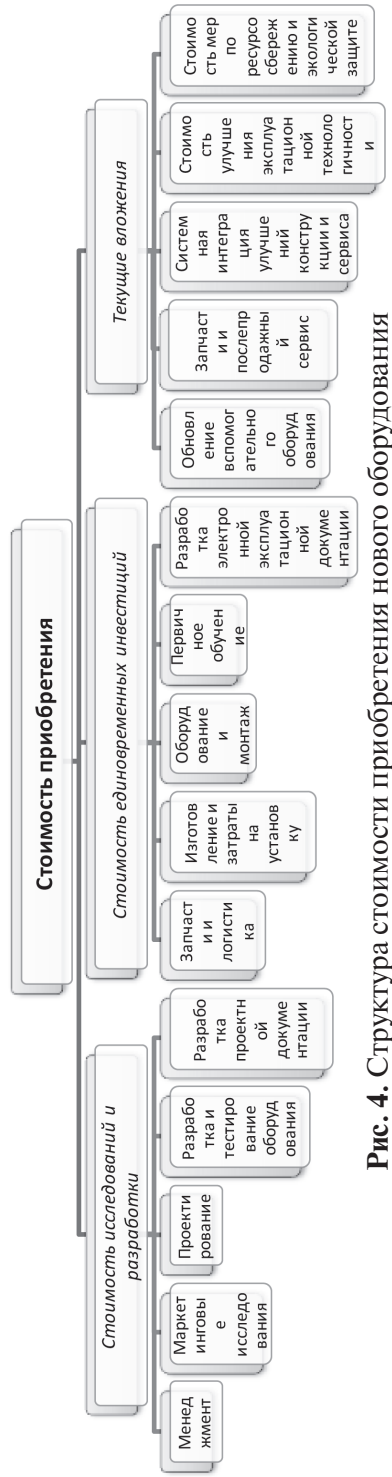


Рис. 4. Структура стоимости приобретения нового оборудования

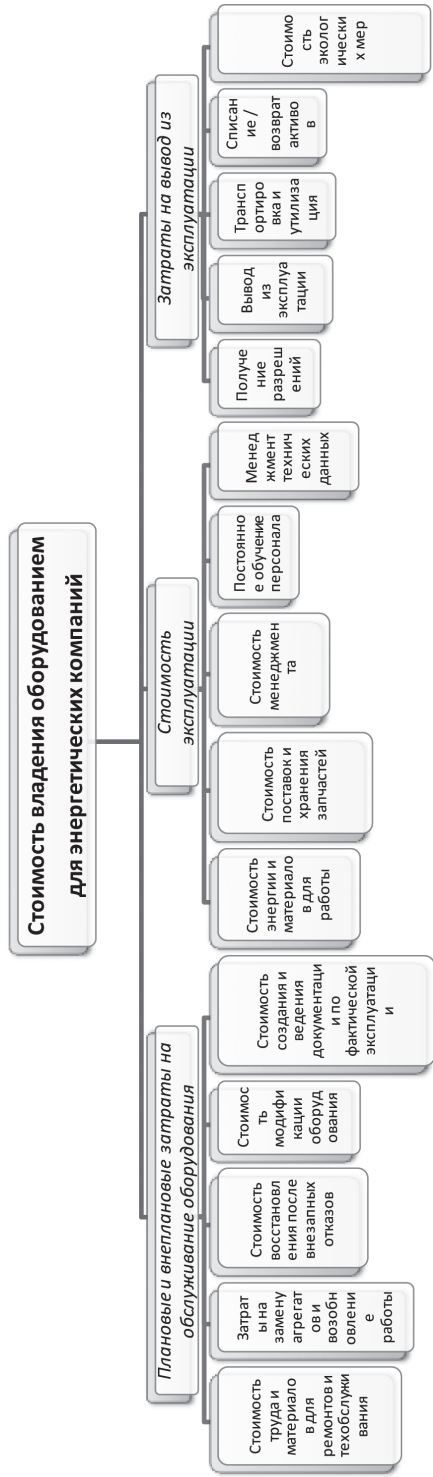


Рис. 5. Структура стоимости владения оборудованием для энергетических компаний

Для расчета затрат на техническое обслуживание $Z_{ТОиР}$ необходимы следующие данные:

- периодичность и объем (вид) технического обслуживания (ТО);
- затраты на материалы, технико-экономические расчеты (ТЭР) и трудоемкость каждого вида ТО (в человеко-часах);
- количество персонала, должность и квалификация персонала, привлеченного для ТО, его часовая тарифная ставка.

При расчете затрат $Z_{план}$ на проведение плановых ремонтов учитываются следующие данные:

- периодичность и объем (вид) проводимых ремонтов;
- затраты на материалы;
- ТЭР и трудоемкость каждого вида ремонта (в человеко-часах);
- количество персонала, должность и квалификация персонала, привлеченного для ремонта, его часовая тарифная ставка.

На наш взгляд, в СЖЦ энергетического оборудования надо обязательно включать расчет затрат $Z_{внепл}$ на проведение внеплановых ремонтов, обусловленных внезапными отказами. Сравнительно недавняя авария на Саяно-Шушенской ГРЭС наглядно показала, к чему могут привести внезапные отказы при эксплуатации основных фондов в энергетике.

При расчете этой группы должны быть выделены затраты, не только связанные с восстановлением готовности изделия, но и учитывающие потери прибыли от эксплуатации — простои техники, штрафные санкции и т.д., а также мероприятия по устранению последствий аварии (например, экологического характера):

$$Z_{внепл} = P(t) \cdot Z_{авар},$$

где $Z_{авар}$ — стоимость устранения последствий аварии, в общем случае получаемая как сумма стоимости ремонта и убытков от простоя оборудования:

$$Z_{авар} = Z_{рем} + Z_{простой}.$$

Убытки от простоя определяются через суточную выработку электроэнергии:

$$Z_{простой} = \text{стоимость (МВт} \times \text{Ч, руб)} \times \\ \times \text{номинальная мощность объекта} \times \text{часы (24)}.$$

Расчет вероятности наступления аварии $P(t)$ на интервале назначенного срока службы строится исходя из следующих допущений: аварийные события представляют простейший стационарный поток без последействия (поток отказов многих объектов техники в период стабильной эксплуатации близки к стационар-

ному потоку), т.е. аварии являются событиями случайными и независимыми, что позволяет суммировать интенсивность событий и использовать распределение Пуассона с постоянным параметром распределения λ :

$$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t},$$

где t — назначенный срок службы объекта.

В периоды приработки и старения изделий потоки отказов нестационарные, и применение распределения Пуассона к этим процессам эксплуатации является некорректным. Рекомендуется применять для оценки состояния оборудования в период старения методы оценки физического и морального износа, хорошо освещенные в научной и практической литературе по ремонту энергетического оборудования.

Таким образом, любое изменение существующего технологического процесса или усовершенствование в конструкции энергетического оборудования также должно быть оценено с точки зрения стоимости ЖЦ для определения экономической целесообразности и обоснования необходимости этих изменений. Сравнение стоимости ЖЦ при существующих и при измененных условиях позволяет оценить срок окупаемости затрат за счет общего снижения стоимости и отклонить те изменения, которые не дают существенных преимуществ.

Результат такого анализа зависит от принятых допущений или используемого критерия оценки стоимости жизненного цикла. Такими критериями могут быть: норма прибыли энергетической компании; долговечность оборудования; коэффициент инфляции; эффективность функционирования; стоимость обслуживания и т.д. При принятии решения о техническом перевооружении и выборе нового энергетического оборудования в рамках PLM-стратегии расчет величины стоимости ЖЦ поможет принять решение, которое принесет наибольшую экономическую выгоду компании.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бром А.Е. *Методология, методы и модели управления организационно-логистической системой поддержки жизненного цикла наукоемкой продукции*. А.А. Колобов, ред. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, 240 с.
- [2] Бром А.Е. Сравнительный анализ стратегий эксплуатации и технического обслуживания сложных технических систем. *Известия вузов, Сер. Машиностроение*, 2009, № 2, с. 71—78.

Статья поступила в редакцию 18.10.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бром А.Е., Белова О.В., Сиссиньо Алессандро. Базовая модель стоимости жизненного цикла энергетического оборудования. *Гуманитарный вестник*, 2013, вып. 10. URL: <http://hmbul.bmstu.ru/catalog/econom/log/115.html>

Бром Алла Ефимовна — д-р техн. наук, профессор кафедры «Промышленная логистика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: ibm3@ibm.bmstu.ru

Белова Ольга Владимировна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: ovbelova@yandex.ru

Сиссиньо Алессандро — стажер Миланского технического университета.