

**На правах рукописи**

Иванова Ирина Алексеевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА  
МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЛИНЕЙНОГО  
ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ  
ЭНЕРГИИ МОРСКИХ ВОЛН**

Специальность 05.09.01 – электромеханика и электрические аппараты

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт – Петербург – 2006 г.

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** Одним из перспективных направлений в развитии нетрадиционной энергетики является использование энергии морских и океанических волн, плотность которой является наибольшей по сравнению с другими видами нетрадиционных возобновляющихся источников энергии (НВИЭ) и достигает 30 -70 кВт на единицу ширины волны. Во многих странах мира, обладающих значительным потенциалом энергии волн, ведутся интенсивные исследования возможности ее эффективного использования для выработки электроэнергии. Соответствующие проекты в Дании, Франции, Германии, Греции, Ирландии, Италии, Португалии, Швеции и Великобритании осуществляются при непосредственной государственной поддержке и координируются специально созданной в 1986 г. Европейской Комиссией.

Теоретическому обоснованию, разработке и практической реализации различных технологических схем, способов и устройств для преобразования энергии волн в электрическую энергию посвящено большое количество публикаций зарубежных и отечественных исследователей. Анализ работ Baker N.J, Eriksson J-T., Gardner F., Leijon M., McCabe A., Mueller M.A., Polinder H., Perälä R, Söderlund L., Salonen J., Thorpe T.W., Vihriälä H., Ахмедова Р.Б., Елистратова В.В., Исупова И.И, Лубановского В.И., Рогачевской Г.С., Сергеева А.С., Сидельникова Б.В., Темеева А.А. и др. показал, что из всех возможных конструкций преобразователей энергии волн (ПЭВ), ПЭВ с точечными абсорберами и многополюсными магнитоэлектрическими линейными генераторами (МЭЛГ), благодаря непосредственной связи абсорбера («поплавка») с индуктором генератора, имеют наиболее простую конструкцию, малые массогабаритные показатели, низкую стоимость, высокую надежность и эффективность эксплуатации. В разработке таких ПЭВ по Шведской государственной программе «Возобновляющиеся источники энергии» автор диссертации принимал участие на кафедре «Электричество и исследование грозových разрядов» факультета Электроэнергетики в Университете г. Уппсала (Швеция). Тематика диссертационной работы соответствует одному из перспективных направлений развития электроэнергетики

тики России «Использование нетрадиционных экологически чистых источников энергии, способствующее устойчивому развитию экономики страны».

**Цель работы и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является разработка конструкции и практических рекомендаций по расчету и проектированию МЭЛГ на основе исследования электромеханического преобразования энергии в нем, математического моделирования и анализа электромагнитных полей в генераторе и режимов его работы в различных технологических схемах конвертирования энергии морских волн.

Для этого необходимо было решить следующие основные задачи:

1. Выполнить анализ существующих технологических схем конвертирования энергии морских волн и разработать конструкцию базового варианта МЭЛГ.
2. Исследовать особенности электромагнитных и механических процессов преобразования энергии в МЭЛГ.
3. Количественно оценить влияние структуры магнитной цепи МЭЛГ на гармонический состав кривой изменения индукции магнитного поля в воздушном зазоре между статором и индуктором.
4. Определить электромагнитные параметры обмотки статора на основе расчета и анализа ее магнитного поля по продольной и поперечной осям.
5. Выполнить моделирование нагрузочных режимов работы МЭЛГ в различных технологических схемах ПЭВ.
6. Разработать практические рекомендации по проектированию МЭЛГ на основе полученных в диссертации результатов исследований.

**Методы исследований.** При решении указанных задач использовались методы математической физики и численного расчета стационарных электромагнитных полей, компьютерные технологии решения научных и инженерных задач на основе применения прикладных программных пакетов Elcut 5.3, Simulink системы Matlab 6.5, Mathcad и Calc<sup>\*)</sup>.

**Научная новизна.**

1. Расчетно-теоретически обоснована возможность при анализе электромеха-

---

<sup>\*)</sup> Разработана Dr. K-E. Karlsson, Dr. A. Wolfbrandt в университете г. Уппсала (Швеция).

нических процессов в МЭЛГ замены реальной э.д.с. статора  $e_{1s}(t)$  с меняющейся амплитудой и переменной частотой  $f_g$  эквивалентной э.д.с.  $e_{1sэ}(t)$  с тем же характером изменения во времени амплитуды, но постоянной частотой  $f_{gэ}$ .

2. Предложены критериальные соотношения для выбора числа секторов  $n$ , длин статора  $h_c$  и индуктора  $h_u$  МЭЛГ на стадии его проектирования.

3. На основе решения дифференциального уравнения движения индуктора МЭЛГ показана возможность максимально эффективного преобразования энергии в ПЭВ, варьируя параметры его механической колебательной системы.

4. Разработаны модели различных технологических схем ПЭВ, позволяющие исследовать характер изменения во времени и измерить действующие и средние значения напряжений, токов и мощностей в его элементах.

#### **Практическая значимость.**

1. Теоретически обосновано, что учет переменной скорости движения индуктора МЭЛГ на стадии его проектирования позволяет уточнить расход активных материалов (уменьшить на 12%) и полезную мощность генератора (увеличить на 25%) по сравнению с традиционным расчетом в предположении о постоянстве скорости движения его индуктора.

2. Выполнена количественная оценка влияния пазовой геометрии статора, размеров и формы магнитов индуктора на величину первой гармонической составляющей индукции магнитного поля в воздушном зазоре МЭЛГ, позволившая дать практические рекомендации по их выбору с целью снижения расходов активных материалов при его изготовлении.

3. Показано, что с технико-экономической точки зрения последовательное соединение двух однофазных МЭЛГ с целью уменьшения пульсации напряжения на «звене постоянного тока» в технологических схемах ПЭВ является неоправданным, поскольку мощность второго генератора используется лишь на 25%.

4. Показано, что проектирование МЭЛГ возможно только на основе применения современных компьютерных технологий для расчета магнитных полей и моделирования конкретных режимов работы генератора.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной

работы докладывались и обсуждались на международной конференции «Fifth European Wave Energy Conference» (Корк, Ирландия, сентябрь 2003 г.), международном симпозиуме «International Symposium on Underwater Technology» (Тайпей, Тайвань, апрель 2004 г.), международной конференции NORPIE (Трондхейм, Норвегия, июнь 2004 г.), научно-технической конференции и школе-семинаре «Формирование технической политики инновационных наукоемких технологий» (СПбГПУ, июнь 2004).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, включая тезисы докладов и 8 статей, из них 4 – в рецензируемых журналах.

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 119 страницах текста и содержит 4 раздела, выводы и заключение, 58 рисунков, 21 таблицу и список использованной литературы из 114 наименований.

#### **Содержание работы.**

**В первом разделе** (введении) рассмотрены тенденции развития энергетики в различных странах мира, перспективы использования НВИЭ и конвертирования энергии морских волн, обоснована актуальность работы, выполнен анализ публикаций по теме диссертации, определены цель и основные задачи работы.

**Во втором разделе** дан краткий анализ практически реализованных схем, способов и устройств ПЭВ, обоснован выбор технологической схемы ПЭВ и конструкции разрабатываемого МЭЛГ, рассмотрены вопросы электромеханического преобразования энергии в МЭЛГ, решены задачи рационального выбора значений длин индуктора и статора линейного генератора, а также параметров механической колебательной системы движения его индуктора.

За исключением ПЭВ с точечными абсорберами, все существующие преобразователи, использующие осциллирующий столб воды (OWC), точечные абсорберы (Archimedes Wave Swing (AWS), Point Absorber Wave Energy Converter), плавающие (Floating Wave Power Vessel) или неподвижные («TAPCHAN») бассейны, гидравлические насосы (Hose Pump, McCabe Wave Pump), Salter Duck, Cockerell Raft имеют весьма сложную конструкцию и большие массогабаритные показатели, содержат в своем составе гидравлические

или воздушные турбины, механические редукторы и вращающиеся электрические генераторы, трудоемки в изготовлении и эксплуатации. ПЭВ с точечными абсорберами и многополюсными линейными генераторами лишены указанных недостатков, имеют высокую надежность и эффективность эксплуатации, низкую стоимость и малую металлоемкость.

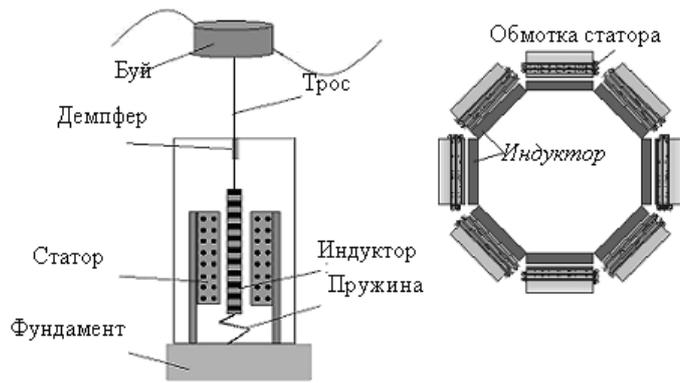


Рис.1. Принципиальная конструктивная схема исследуемого ПЭВ.

Разработанный в диссертации ПЭВ состоит (рис.1) из линейного восьми-секторного генератора, статор которого жестко укреплен на фундаменте, неподвижно лежащем на морском дне, а индуктор соединен тросом с буйем и связан пружиной с фундаментом. На поверхности индуктора закреплены постоянные магниты (ПМ) из композиционного материала NdFeB. Число и размеры ПМ приняты минимальными для получения требуемых значений э.д.с. обмотки статора и коэффициента электромагнитной редукции частоты морской волны  $f_w$  с учетом технологических ограничений на выбор пазовой геометрии статора.

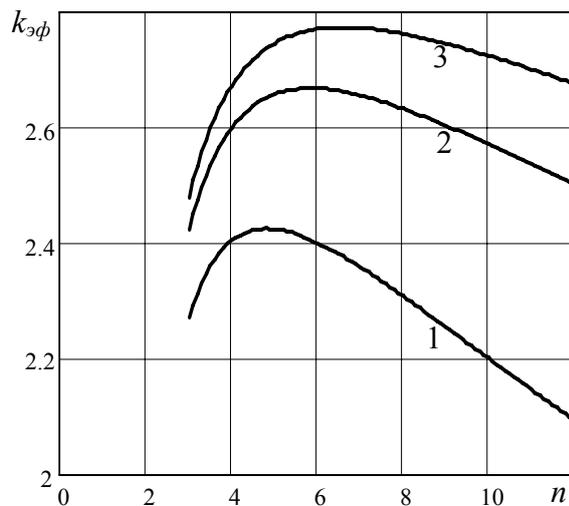
Важным элементом конструкции МЭЛГ является количество его секторов  $n$ . Рациональное значение  $n$  определяется степенью использования меди обмотки статора – соотношением активной длины проводника обмотки статора  $l_a$  и длины его лобовой части  $l_s = (1.2 \div 1.3) \cdot \tau$ . Максимальное значение произведения суммарной длины  $l_{a\Sigma}$  всех секторов МЭЛГ на коэффициент использования меди  $k_\mu$  предложено в работе считать показателем рационального выбора  $n$ . Это произведение – эффективная длина обмотки статора

$$l_{a\text{эф}} = k_\mu \cdot l_{a\Sigma} = N \cdot D_c \cdot \frac{n \cdot \sin^2 \frac{\pi}{n}}{\sin \frac{\pi}{n} + 1.25 \cdot \frac{\tau}{D_c}} = N \cdot D_c \cdot k_{\text{эф}}. \quad (1)$$

Из рассмотрения зависимостей  $k_{\text{эф}} = f(n)$  на рис.2 следует, что рациональ-

ное число секторов  $n$  в МЭЛГ мощностью  $100 \div 120$  кВт при  $D_c = 1$  м равно 6, а при иных  $n$  излишний расход меди на обмотку статора составляет  $(1.5 \div 7)\%$ .

Основной физической особенностью электромеханического преобразования энергии морских волн в МЭЛГ является периодический характер изменения скорости перемещения его индуктора, в результате чего э.д.с., индуцируемая в обмотке статора, имеет изменяющиеся во времени амплитуду и частоту. Обычно эта особенность при проектировании МЭЛГ не учитывается, и соот-



ответствующие расчеты ведутся в предположении о постоянстве скорости движения индуктора, а первая гармоническая составляющая э.д.с. одновиткового контура на поверхности статора с шагом  $y_1 = \tau$  определяется из выражения:

Рис. 2 Зависимости  $k_{эф} = f(n)$  при  $D_c = 0.5$  м (кривая 1),  $D_c = 1$  м (2) и  $D_c = 1.5$  м (3)

$$e_1 = -\frac{d\Psi_1}{dt} = 2B_{1m}l_c \frac{4A}{T_w} \sin(2\pi f \cdot t) = 2B_{1m}l_c V_{хсп} \sin(2\pi k_p f_w t), \quad (2)$$

где  $A$  – амплитуда морской волны,  $T_w$  и  $f_w$  – ее период и частота,  $l_c$  – активная длина статора,  $B_{1m}$  – основная гармоническая составляющая индукции магнитного поля в воздушном зазоре между статором и индуктором, а  $k_p = 2A/\tau$  – коэффициент редукции частоты волны  $f_w$ . При учете синусоидального характера движения индуктора выражение (2), как показано в работе, приобретает вид:

$$e_{1s} = -\frac{d\Psi_{1s}}{dt} = 4\pi \frac{A}{T_w} l_c B_{1m} \sin\left(\frac{\pi}{2} k_p \sin(2\pi f_w t)\right) \cos(2\pi f_w t). \quad (3)$$

Из сопоставительного анализа (2), (3) и соответствующих кривых на рис. 3 следует, что реальная  $e_{1s}$  изменяется по периодическому закону с переменными амплитудой и частотой, причем ее амплитуда и частота уменьшаются от  $E_{1sm}$  и  $f_{max} = \pi k_p f_w / 2$  до нуля за период времени  $t$  от 0 до  $T_w / 4$ . Отношение действующих значений  $E_{1s} = 0.5 E_{1sm}$  и  $E_1 = E_{1m} / \sqrt{2}$ , с учетом соотношения их амплитуд

$E_{1sm}/E_{1m}=\pi/2$ , равно 1.12, а, следовательно, при работе генератора на активную

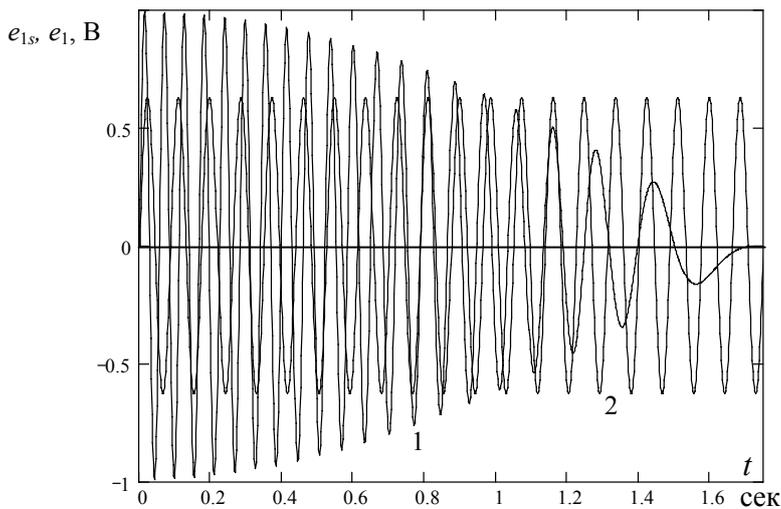


Рис. 3. Зависимости  $e_{1s}=f(t)$  (кривая 1) и  $e_1=f(t)$  (кривая 2) в одновитковом контуре на поверхности статора МЭЛГ с  $B_{1max}=0.69$  Тл,  $l_c=0.4$  м и  $\tau=0.05$  м при  $A=2$  м и  $T_w=7$  с.

нагрузку его реальная полезная мощность более чем на 25% превышает мощность МЭЛГ, рассчитанную по средней скорости движения его индуктора. В реальных условиях эксплуатации нагрузкой МЭЛГ являются активно-реактивные элементы технологической схемы ПЭВ.

Для определения тока в них

необходимо разложение  $e_{1s}(t)$  в ряд Фурье. Для адекватного отражения характера изменения  $e_{1s}(t)$  необходимо учитывать более 70 ее гармонических составляющих. Поэтому в работе была поставлена задача поиска эквивалентной синусоидальной функции  $e_{1s9}(t)$  с амплитудой  $E_{1sm}$ , частота модуляции которой была бы равна  $f_w$ , а величина несущей частоты наиболее полно соответствовала значению несущей частоты реальной  $e_{1s}(t)$ . Из рассмотрения (3) следует, что среднее значение несущей частоты э.д.с.  $e_{1s}(t)$  линейного генератора за время от нуля до  $t=f_g(t)=\text{ceil}(0.25k_p \sin(2\pi f_w t))/t$ . При  $t=0$   $f_{g9}(0)=\pi k_p f_w/2$ , а при  $t=T_w/4f_{g9}=k_p f_w$ . Выбор рационального значения  $f_{g9}$  зависит от характера нагрузки генератора и механических ограничений на перемещение индуктора. Для количественной оценки погрешности замены реальной  $e_{1s}(t)$  эквивалентной  $e_{1s9}(t)$  было выполнено математическое моделирование в Simulink Matlab 6.5 различных режимов работы реального и эквивалентного генераторов. Анализ расчетных данных показал, что увеличение  $f_{g9}$  до значения  $f_{g9}(0)$  позволяет уменьшить погрешность эквивалентирования фазного тока  $I_\phi$  и мощности генератора  $P$  до (5–10)%. Поэтому окончательные выражения для определения первой гармони-

ческой составляющей эквивалентной э.д.с. фазы МЭЛГ на стадии его проектирования при  $q = 1$  и  $y_l = \tau$  можно представить в виде:

$$e_{1\phi} = 4\pi A f_w l_c w_\phi B_{1m} \sin(\pi^2 k_p f_w t) \cdot \cos(2\pi f_w t) = E_{1\phi m} \sin(2\pi f_{g\phi} t) \cdot \cos(2\pi f_w t), \quad (4)$$

$$E_{1\phi} = 0.5 E_{1\phi m} = 2\pi A f_w l_c w_\phi B_{1m}, \quad (5)$$

где  $w_\phi$  – число витков в фазе, а  $f_{g\phi} = \pi k_p f_w / 2$ .

Выражение (4) для расчета  $e_{1\phi}$  можно представить и в виде суммы двух э.д.с. с постоянными и равными амплитудами  $2\pi A f_w l_c w_\phi B_{1m}$  и постоянными, но разными частотами  $f_{g\phi 1} = (0.5\pi k_p + 1)f_w$  и  $f_{g\phi 2} = (0.5\pi k_p - 1)f_w$ .

С учетом реальной работы МЭЛГ на выпрямительную нагрузку в ПЭВ важной задачей его проектирования является получение как можно большей  $E_{1\phi}$  при минимизации расхода активных материалов. Эта задача, по существу, сводится к выбору  $w_\phi$ , то есть длины индуктора  $h_u$  для обеспечения требуемого коэффициента редукции частоты  $k_p(\tau)$  и допустимой плотности тока в обмотке статора ( $t_z$ ). Для осуществления синусоидального движения индуктора в реальных ПЭВ необходимо также выбирать параметры механической колебательной системы: буй – индуктор – пружина возврата – механические демпферы.

Задача рационального выбора длин статора  $h_c$  и индуктора  $h_u$  имеет важное значение для определения габаритов преобразователя в целом. Если выбрать  $h_c = 2A = h$ , а  $h_u = 2 h_c$ , то при движении индуктора все проводники обмотки статора

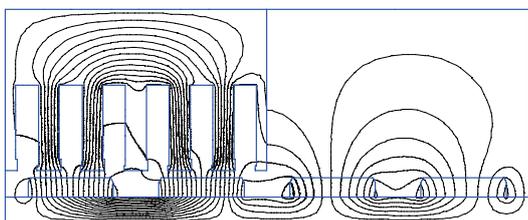


Рис.4 Картина магнитного поля и распределения индукции в торцевой зоне МЭЛГ.

ра будут принимать участие в электро-механическом процессе преобразования энергии, но при этом нерационально используются дорогостоящие ПМ. Кроме того, ПМ, находящиеся вне статора (рис. 4), работают в режиме холостого хода, что может привести к

их размагничиванию. Чтобы при своем движении индуктор не выходил за пределы статора, необходимо выполнение условия  $h_c = h_u + 2A$ , а  $h_u = 2\tau t$  было бы достаточным для получения требуемого значения э.д.с. в обмотке статора нужной частоты  $f = k_p f_w$ . При выбранной в соответствии с этим условием длиной

статора  $h_c$  возможно получение еще большей э.д.с.  $E_{1\phi}$  при дальнейшем увеличении  $h_u$ . В качестве показателя этого в работе получено выражение для коэффициента увеличения  $E_{1\phi}$  в виде:

$$\underline{k}_e = \frac{(h_{uo} + \Delta h_u)(h_c - h_{uo} - \Delta h_u)}{2Ah_{uo}}, \quad (6)$$

где  $h_{uo}$  – начальное значение длины индуктора  $h_u$ ,  $\Delta h_u$  – ее возможное приращение при  $h_c = h_{uo} + 2A = \text{const}$ , а  $2Ah_{uo}$  – базисное значение  $k_e$ , определяющее предварительную величину э.д.с. фазы  $E_{1\phi}$ . Соответствующие зависимости  $\underline{k}_e = f(\Delta h_u)$  для трех начальных значений  $h_{uo}$ , равных 1, 2 и 4 м, при  $A = 2$  м представлены на рис. 5. Из их сопоставления и анализа следует, что достижение максимальной э.д.с. фазы  $E_{1\phi}$  при  $\underline{k}_{e \max} = h_c^2 / 8Ah_{uo}$  и  $\Delta h_{u \max} = (h_c - 2h_{uo})/2$  (при  $h_u = h_c/2$ ) за счет увеличения предварительно выбранного значения  $h_{uo}$  нецелесообразно из-за непропорционального возрастания габаритов индуктора. Например, при  $h_{uo} = 1$  м и  $h_c = 5$  м увеличение  $h_u$  в 2.5 раза до  $h_c/2 = 2.5$  м приводит к возрастанию  $E_{1\phi}$  в на 56%, а при  $h_{uo} = 2$  м увеличение  $h_u$  в 1.5 раза вызывает рост  $E_{1\phi}$  лишь на 12.5%.

В базовом варианте разрабатываемого МЭЛГ по сравнению со «шведским» аналогом той же мощности и фазным напряжением, удалось получить то же фазное напряжение при увеличении  $h_c$  на 25% (с 5.2 до 6.5 м) и уменьшении длины индуктора на 57% (с 5.8 до 2.5 м). При этом масса магнитов, несмотря на увеличение их ширины ( $\alpha$  – с 0.47 до 0.65), снизилась с 500 до 300 кг, а масса стали индуктора – с 2175 до 930 кг.

Дифференциальное уравнение, описывающее характер вертикального перемещения индуктора, имеет вид:

$$m \frac{dx^2}{dt^2} = F_{buoy} + F_{em} + F_{spring} + F_{stop} + F_g, \quad (7)$$

где  $F_{buoy} = \rho_{water} g \Delta V$  – гидродинамическая сила Архимеда, выталкивающая буй,  $F_{em}$  – электромагнитная сила, равная производной от энергии магнитного поля в зазоре генератора,  $F_{spring} = -F_0 + k_{sp} \cdot x$  – механическая сила пружины, завися-

шая от силы ее начального сжатия  $F_0$  и жесткости  $k_{sp}$ ,  $F_{stop} = k_{stop} \cdot x$  – сила концевых демпферов с жесткостью  $k_{stop}$ , а  $F_g = -mg$  – гравитационная сила.

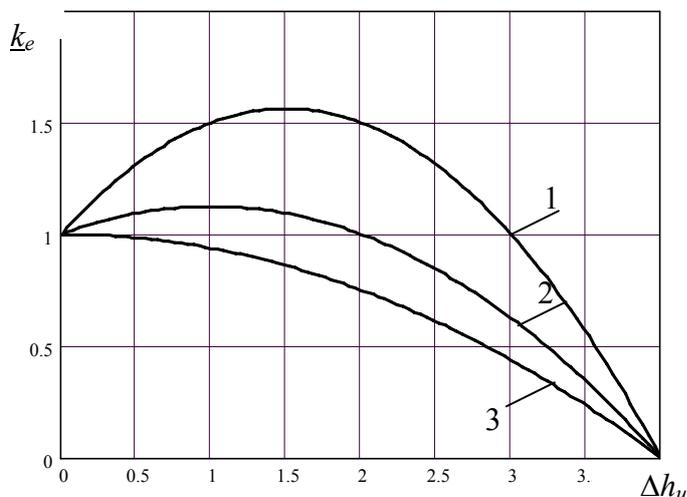


Рис.5. Зависимости коэффициента увеличения э.д.с. фазы  $E_{1\phi}$  обмотки статора  $k_e = f(\Delta h_u)$  при различных начальных значениях длины индуктора  $h_{u0}$  и  $A = 2$  м (1 кривая –  $h_{u0} = 1$  м, 2 –  $h_{u0} = 2$  м, 3 –  $h_{u0} = 4$  м).

В работе показано, что, варьируя  $F_0$ ,  $k_{sp}$  и  $k_{stop}$ , можно добиться синусоидального перемещения индуктора

и максимального преобразования энергии в ПЭВ. Так, в частности, при отсутствии пружины средняя выходная мощность генератора  $P = 136$  кВА снижается на 67% (рис.6), при увеличении  $k_{sp}$  в 8 раз – соответственно на 37% и  $F_0$  в 2 раза – на 33%.

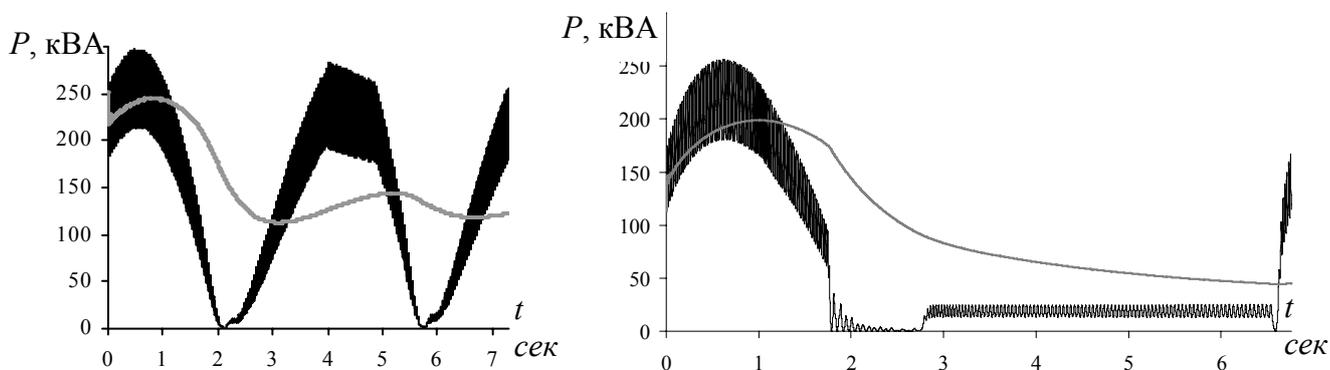


Рис. 6. Изменение мощности генератора при различных параметрах пружины.

**В третьем разделе** диссертации приведены результаты количественной оценки влияния пазовой геометрии статора и геометрических размеров индуктора на гармонический состав кривой изменения индукции  $B_\delta(x)$  стационарного двухмерного магнитного поля в зазоре МЭЛГ и значения электромагнитных параметров его обмотки статора по продольной и поперечным осям.

Расчет и анализ магнитных полей индуктора и статора проводился методом конечных элементов с использованием пакета решения задач матфизики Elcut 5.3.

На рис.7 представлена кривая изменения  $B_{\delta}(x)$  на поверхности статора базового варианта МЭЛГ с  $\delta=3$  мм и  $h_m=8$  мм, а в табл. 1 сведены относительные

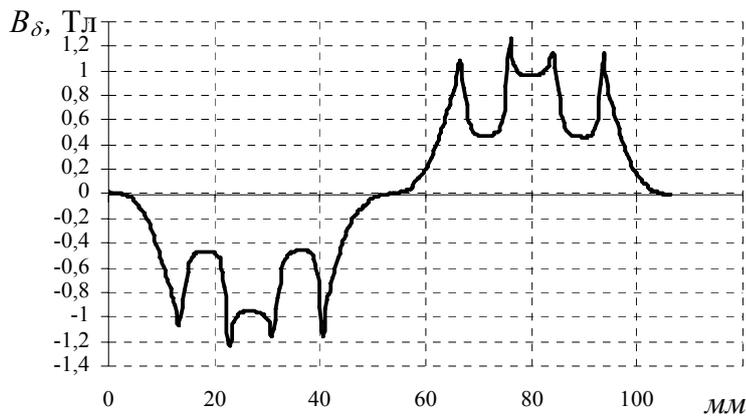


Рис. 7 Распределение индукции магнитного поля индуктора на двойном полюсном делении по поверхности статора.

значения гармонических составляющих  $B_{\delta v} / B_{\delta 1}$  при варьировании размеров паза  $h_{\text{п}}$ ,  $b_{\text{п}}$  и  $b_{\text{ш}}$ . Кроме этого, в разделе представлены в графической и табличной формах значения  $B_{\delta v} / B_{\delta 1}$  при изменении  $\delta$ , ширины  $b_m$ , формы  $b_m / b_{m0}$  и высоты  $h_m$  постоянных магнитов (ПМ), а также степени их заглупления  $d$  в тело индуктора. Из их рассмотрения следует, что глубина паза  $h_{\text{п}}$  практически не влияет на гармонический состав  $B_{\delta}(x)$ , а уменьшение ширины паза  $b_{\text{п}}$  на 57%, по сути эквивалентное изменению его открытия  $b_{\text{ш}}$  на ту же величину, позволяет повысить  $B_{\delta 1}$  на 6-8%. Практически такое же количественное влияние на  $B_{\delta 1}$  оказывают увеличение  $b_m$  ( $\alpha$  от 0.65 до 0.8) и  $h_m$  на 25%, применение трапецидальных ПМ с отношением  $b_m / b_{m0}$  от 1 до 0.65, заглупление ПМ в тело индуктора  $d$  на  $0.75 h_m$ . В целом незначительное влияние на  $B_{\delta 1}$  перечисленных геометрических параметров при их широком варьировании в сочетании с рациональным выбором  $h_c$  и  $h_u$  указывает на возможность минимизации удельных расходов активных материалов. В диссертации предложены для применения на стадии инженерного проектирования МЭЛГ

Таблица 1

Изменяемые параметры	$B_{\delta 1}, \%$	$B_{\delta 3}, \%$	$B_{\delta 5}, \%$	$B_{\delta 7}, \%$	$B_{\delta 9}, \%$
Базовый вариант $h_{\text{п}} = 34.81$ мм, $b_{\text{п}} = 9.2$ мм	100	3.6	3	26	2.4
Высота паза $h_{\text{п}} = 17$ мм	101	4	3.2	26	2.26
Открытие паза $b_{\text{ш}} = 4$ мм	104.89	3.45	8	15.5	2.6
Открытие паза $b_{\text{ш}} = 2$ мм	106.8	3.6	11.8	10.7	2.86
Ширина паза $b_{\text{п}} = 4$ мм	107	4.76	7.38	14.5	1.19
Ширина паза $b_{\text{п}} = 2$ мм	108.45	4.5	11.4	0.95	1.19
Гладкий якорь	110.2	4.62	14.76	5.24	1.55

зации удельных расходов активных материалов. В диссертации предложены для применения на стадии инженерного проектирования МЭЛГ

два логически связанных и отчасти самостоятельных подхода к определению геометрических размеров статора и индуктора. Первый из них предполагает уменьшение, а второй увеличение на 10-12% за счет изменения  $h_m$  предварительного значения  $B_\delta$ , полученного из условия максимального использования энергии ПМ. Затем, варьируя пазовую геометрию статора и изменяя ширину, высоту и форму магнитов, в первом случае можно минимизировать объем ПМ, а во втором - расходы стали, меди и, в известной мере, композиционного материала ПМ. Сочетание указанных подходов позволило в базовом варианте МЭЛГ мощностью 100 кВт получить следующие удельные расходы:  $m_m = 3$  кг/кВт,  $m_{Fe} = 57$  кг/кВт,  $m_{Cu} = 6.4$  кг/кВт,  $m_\Sigma = 66$  кг/кВт.

Целью исследования магнитных полей обмотки статора являлось определение ее электромагнитных параметров  $L_d$  и  $L_q$ , необходимых для последующего моделирования режимов работы МЭЛГ. В диссертации были получены матрицы собственных и взаимных индуктивностей фаз, рассчитаны их эквивалентные индуктивности по продольной и поперечной осям. Причем собственные индуктивности определялись по значениям соответствующих потокосцеплений  $\psi$  и энергий магнитного поля  $W$ , а взаимные – только по потокосцеплениям. Составление матриц собственных и взаимных индуктивностей показало, что при размещении ПМ на поверхности индуктора эквивалентные  $L_d$  и  $L_q$  равны между собой. При полностью утопленных в тело индуктора ПМ эквивалентная индуктивность фазы обмотки статора  $L_q$  увеличивается на 40%, а  $L_d$  – на 30%. Кроме того, в работе установлено, что при уменьшении  $b_z$  на 47% (с 8.5 до 4.5 мм)  $L_{sq}$  снижается на 23%, а применение полузакрытого паза со шлицем  $b_{ш} = 4$  мм приводит к ее увеличению на 15%. Изменение величины воздушного зазора с 2 до 4 мм мало (< 3%) сказывается на значениях индуктивностей  $L_{sq}$  и  $L_{sq}$ . Полученное значение  $L_q = L_d = L_a$  было использовано при моделировании работы МЭЛГ в составе ПЭВ.

**В четвертом разделе** представлены результаты моделирования и исследований режимов независимой и последовательной работы однофазных и трехфазных МЭЛГ в составе ПЭВ на выпрямительную и емкостную аккумулирующую

щую нагрузки, а также на автономный управляемый инвертор напряжения (АИН). Все соответствующие модели были разработаны в Simulink Matlab 6.5.

Для исследования особенностей работы МЭЛГ на «звено постоянного тока» в ПЭВ и для построения обобщающей модели преобразователя последовательно создавались модели ПЭВ, содержащие однофазные и трехфазные линейные генераторы, работающие сначала через мостовой диодный

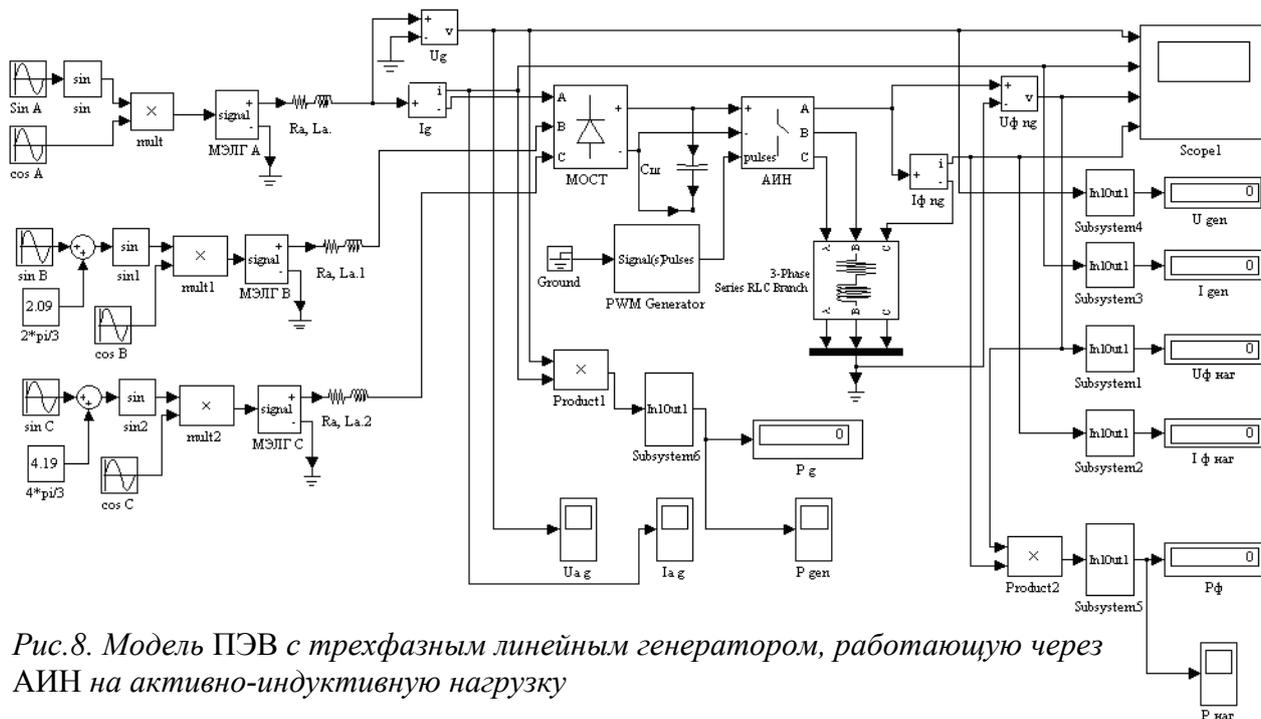


Рис.8. Модель ПЭВ с трехфазным линейным генератором, работающую через АИН на активно-индуктивную нагрузку

выпрямитель, а затем и через инвертор на активно-индуктивную нагрузку. Для всех этих моделей были разработаны подсистемы измерения действующих значений напряжений и токов и средних значений мгновенной мощности в генераторе и нагрузке  $U_{gen}$ ,  $I_{gen}$ ,  $P_{gen}$  и  $U_{ng}$ ,  $I_{ng}$ ,  $P_{ng}$ . Была предусмотрена возможность визуального наблюдения за характером изменения этих параметров во времени. В качестве метода интегрирования исходных дифференциальных уравнений был выбран многошаговый метод переменного порядка ode 15s, использующий формулы численного дифференцирования. Обобщающая модель ПЭВ с трехфазным МЭЛГ, «звеном постоянного тока» и АИН представлена на рис. 8. Указанные модели позволили установить, что в результате применения весьма большой, но все-таки вполне реальной и по габаритам и стоимости, шунтирующей емкости  $C_{ш} = 0.1$  Ф удастся снизить пульсации выпрямленного напря-

жения в нагрузке или на входе АИН до вполне приемлемых для непосредственного использования значений в 10-15%. Применение с той же целью последовательное соединение двух однофазных МЭЛГ, выходные напряжения которых сдвинуты на четверть периода морской волны  $T_w$  по времени, неоправданно, поскольку мощность второго генератора используется *лишь* на 25%. Установлено, что МЭЛГ с  $U_{\phi n} = 1200$  В, работающий в ПЭВ на АИН, позволяет получить у потребителя стабильное напряжение 380/220 В частотой 50 Гц.

### **Выводы и заключение.**

По результатам выполненной диссертационной работы могут быть сделаны следующие основные выводы:

1. Установлено, что рациональное число секторов  $n$  в МЭЛГ мощностью 100÷120 кВт равно шести, а при  $n = 4, 8$  или 12 неоправданный расход меди на обмотку статора составляет от 1.5 до 7%.
2. Теоретически обосновано, что учет переменной скорости движения индуктора МЭЛГ на стадии его проектирования позволяет уточнить расход активных материалов (уменьшить на 12%) и полезную мощность генератора (увеличить на 25%) по сравнению с традиционным расчетом в предположении о постоянстве скорости движения его индуктора.
3. Показана необходимость и возможность при анализе электромеханических процессов в МЭЛГ замены его реальной э.д.с. статора  $e_{1s}(t)$  с непрерывно меняющейся амплитудой и переменной частотой  $f_g$  эквивалентной э.д.с.  $e_{1ss}(t)$  с тем же характером изменения во времени амплитуды и постоянной частотой  $f_{gэ}$ .
4. Предложены критериальные соотношения для рационального выбора длин статора  $h_c$  и индуктора  $h_u$  генератора, позволившие установить, что достижение максимума э.д.с. обмотки статора за счет увеличения длины индуктора до очевидного и обычно рекомендуемого значения  $h_u = h_c/2$  нецелесообразно с позиций рационального расхода массы постоянных магнитов и ферромагнитных материалов индуктора.

5. Показано, что, варьируя жесткость материала и начальное значение силы сжатия пружины, связывающей индуктор с неподвижным фундаментным щитом, можно добиться максимального преобразования энергии в ПЭВ. При отсутствии пружины в генераторе мощностью 136 кВА мощность снижается на 67%, при увеличении жесткости пружины в 8 раз уменьшение составляет 37%, а возрастание силы ее сжатия в 2 раза уменьшает мощность на 33%.
6. Выполнена количественная оценка влияния пазовой геометрии, размеров и формы магнитов индуктора на величину первой гармонической составляющей индукции магнитного поля в воздушном зазоре МЭЛГ, позволившая дать практические рекомендации по их определению на стадии инженерного проектирования генераторов мощностью 80÷140 кВА.
7. Разработаны модели различных технологических схем ПЭВ, позволяющие исследовать характер изменения во времени и измерить действующие и средние значения напряжений, токов и мощностей в элементах ПЭВ при широком варьировании параметров его нагрузки.
8. Показано, что применение в ПЭВ трехфазного МЭЛГ с  $U_{\phi n} = 1200$  В ( $U_{\phi m} = 2400$  В) и АИН с регулируемым коэффициентом модуляции позволяет получить на его выходе стандартное переменное напряжение 380/220 В частотой 50 Гц при уменьшении напряжения МЭЛГ (амплитуды морской волны) более чем в три раза.

В целом, анализируя все изложенные в диссертационной работе материалы и полученные результаты можно утверждать, что ПЭВ с МЭЛГ имеют наиболее простую конструкцию, малые массогабаритные показатели, высокую надежность и эффективность эксплуатации, наибольшую технико-экономическую привлекательность для массового практического применения.

#### **Публикации по теме диссертации.**

1. I. Ivanova, O Ågren, H. Bernhoff, M. Leijon, Simulation of a 100 kW permanent magnet octagonal linear generator for ocean wave conversion // Book of abstracts. Fifth European Wave Energy Conference – Cork, Ирландия, – 2003г – с. 53-54
2. I. Ivanova, Ågren O., Bernhoff H., Leijon M. Simulation of a 100 kW permanent

- magnet octagonal linear generator for ocean wave conversion //Conference proceedings of 5-th European Wave Energy Conference.–Cork, Ireland. –2003.– p. 191-196.
3. Ivanova I.A., Ågren O., Bernhoff H., Leijon M. Simulation of cogging in a 100 kW permanent magnet octagonal linear generator for ocean wave conversion //Int. Symposium on Underwater Technology. – Taipei, Taiwan. – April 2004. – IEEE Catalog number: 04EX869, SEIKEN Symposium No. 36. – p. 345-348.
4. Bolund B., Segergren E., Solum A., Perers R., Lundström L., Lindblom A. et al. Rotating and Linear Synchronous Generators for Renewable Electric Energy Conversion – an Update of the Ongoing Research Projects at Uppsala University // Conference proceedings of NORPIE. –Трондхейм, Норвегия. –Июнь 2004. – p. 137-141.
5. Иванова И. А. Использование линейных генераторов с постоянными магнитами для преобразования энергии морских волн в электрическую энергию //Труды конференции. Формирование технической политики инновационных наукоемких технологий. – СПбГПУ. – 2004. – С. 111 – 118.
6. Иванова И. А., Огрен У., Бернхофф Х., Лейён М. Моделирование восьмиугольного линейного генератора мощностью 100 кВт с постоянными магнитами для использования энергии океанических волн //Научно-Технические Ведомости. – СПбГПУ. – Август 2004. – № 1 (35). – С. 239 – 243.
7. I. Ivanova. Simulation of Linear Permanent Magnet Octagonal Generator for Sea Wave Energy Conversion //UURIE 295-04L, ISSN 0349-8352. – Uppsala University, Sweden. – 2004. – 36 p.
8. I. Ivanova, O Agren, H. Bernhoff, M. Leijon. Simulation of Wave Energy Converter with Octagonal Linear Generator // IEEE Journal of Oceanic Engineering, ISSN: 0364-9059, Volume 30, Issue 3 – 2005 – p. 619-629.
9. I. Ivanova, H. Bernhoff, O Ågren, M. Leijon Simulated Generator for Wave Energy Extraction at Deep Water //Elsevier Science. Ocean Engineering.–октябрь 2005.–Oxford ISSN 0029-8018, OX5 1GB, U.K.–Vol.32, Issue 14-15.–p.1664-1678.
10. M. Leijon, O. Danielsson, V. Eriksson, K. Thorburn, H., Ivanova I.A. et al. An electrical approach to wave energy conversion // Renewable Energy Journal. – Elsevier Science LTD. – 31 – 2006. – p. 1309-1319.