

УДК 621.313

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРАХ С ПРОДОЛЬНОМ И КОМБИНИРОВАННЫМ НЕЛИНЕЙНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ МАГНИТНОГО ПОТОКА

**А. Б. МЕНЖИНСКИЙ, А. Н. МАЛАШИН,
О. В. СИДЯКО, П. Б. МЕНЖИНСКИЙ**

Военная академия Республики Беларусь, г. Минск

Ключевые слова: электромагнитные процессы, электромеханический преобразователь энергии, возвратно-поступательный электрический генератор, магнитное поле, закономерность, электродвижущая сила.

Введение

В настоящее время в качестве перспективных электромеханических преобразователей энергии рассматриваются возвратно-поступательные электрические генераторы (ВПЭГ) с поперечным изменением магнитного потока (линейные генераторы) [1]–[7], нашедшие широкое применение в энергоустановках «свободнопоршневой двигатель – электрический генератор» [7]–[19].

Исследования ВПЭГ с поперечным изменением магнитного потока показали, что основным их недостатком является сложность обеспечения согласования сил электрической (электрический генератор) и механической (двигатель) подсистем энергоустановки в крайних положениях подвижной части [20]. При пропуске зажигания рабочей смеси в энергоустановках «свободнопоршневой двигатель – электрический генератор» это может привести к поломке [10], [18].

В [20] обосновано, что задачу согласования сил электрической и механической подсистем энергоустановки способен решить ВПЭГ с комбинированным (поперечным и продольным) нелинейным изменением магнитного потока. В [21] представлен широкий спектр новых структур ВПЭГ с комбинированным (поперечным и продольным) нелинейным изменением магнитного потока. Однако до настоящего времени исследованию электромагнитных процессов в таких ВПЭГ не уделялось должного внимания [22], что не позволяет в полной мере выработать рекомендации по выбору геометрических размеров магнитной системы на начальном этапе электромагнитного расчета ВПЭГ продольного и комбинированного типов, а также определить эффективные условия их применения (величину рабочего хода, мощностной диапазон).

Целью работы является исследование электромагнитных процессов в ВПЭГ с продольным и комбинированным нелинейным изменением магнитного потока для выявления закономерностей изменения основных параметров генераторов (магнитных потоков, электродвижущей силы (ЭДС), удельной массы и КПД) от геометрических размеров их магнитной системы, а также кинематических параметров (скорости, частоты и координаты) подвижной части генератора.

Основная часть

Для выявления закономерностей изменения магнитных потоков (рассеяния и выпучивания) генераторов от геометрических размеров их магнитной системы в

программном продукте *Elcut* построены двухмерные конечно-элементные (КЭ) модели магнитного поля (МП) магнитных систем ВПЭГ продольного, поперечного и комбинированного типов. На рис. 1 представлены двухмерные КЭ модели МП тех областей магнитных систем генераторов продольного, поперечного и комбинированного типов, которые имеют магнитные потоки различного характера и тем самым представляют повышенный интерес для исследования картины распределения МП.

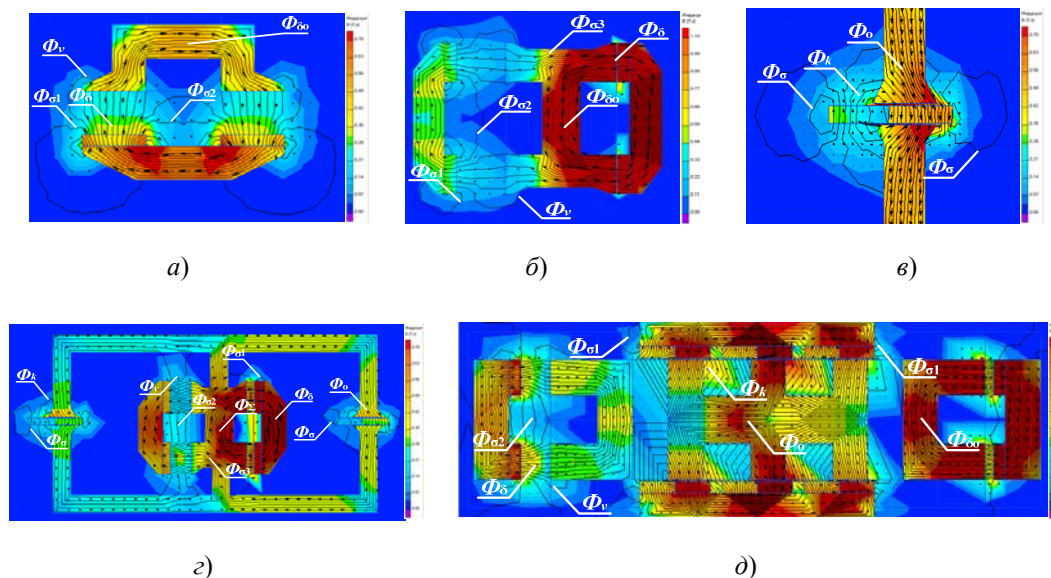


Рис. 1. Двухмерные КЭ модели МП магнитных систем:
 а – однополярного 2-полюсного генератора продольного типа; б – разнополярного генератора продольного типа; в – генератора поперечного типа; г – комбинированного генератора с общим магнитопроводом (МПр); д – комбинированный генератор с раздельным МПр

Из рис. 1 видно, что в магнитной системе ВПЭГ продольного, поперечного и комбинированного типов существуют различные магнитные потоки: рабочие магнитные потоки $\Phi_{\delta o}$ (ВПЭГ продольного типа), Φ_o (ВПЭГ поперечного типа) и Φ_{Σ} (ВПЭГ комбинированного типа), включающие в себя магнитный поток, сосредоточенный в воздушном зазоре между полюсами Φ_{δ} , и поток выпучивания (краевого эффекта) Φ_v (Φ_k). Рабочие магнитные потоки сцепляются с витками рабочей обмотки и играют решающую роль в процессе преобразования энергии; потоки выпучивания Φ_v (ВПЭГ продольного типа) и краевого эффекта Φ_k (ВПЭГ поперечного типа), проходящие через воздушные промежутки по краям полюсов и замыкающиеся по МПр, также сцепляются с витками рабочей обмотки; потоки рассеяния Φ_{σ} , $\Phi_{\sigma 1}$, $\Phi_{\sigma 2}$, $\Phi_{\sigma 3}$ – это магнитные потоки, которые не сцепляются с витками рабочей обмотки. Следует отметить, что основным отличием разнополярного возвратно-поступательного электрического генератора (РВПЭГ) от однополярного ВПЭГ и одновременно недостатком является наличие в магнитной цепи сквозного потока рассеяния $\Phi_{\sigma 3}$.

Кроме того, из рис. 1, г, д видно, что в магнитной системе КГ с общим и раздельным МПр существуют магнитные потоки, характерные как для ВПЭГ поперечного, так и для продольного типа.

Анализ результатов исследования двухмерных КЭ моделей МП магнитных систем ВПЭГ позволил выделить следующие базовые модули ВПЭГ: поперечного типа, однополярного продольного типа, разнополярного продольного типа и комбинированного типа с общим МПр, структуры магнитных систем которых с обозначением их основных магнитных потоков представлены на рис. 2.

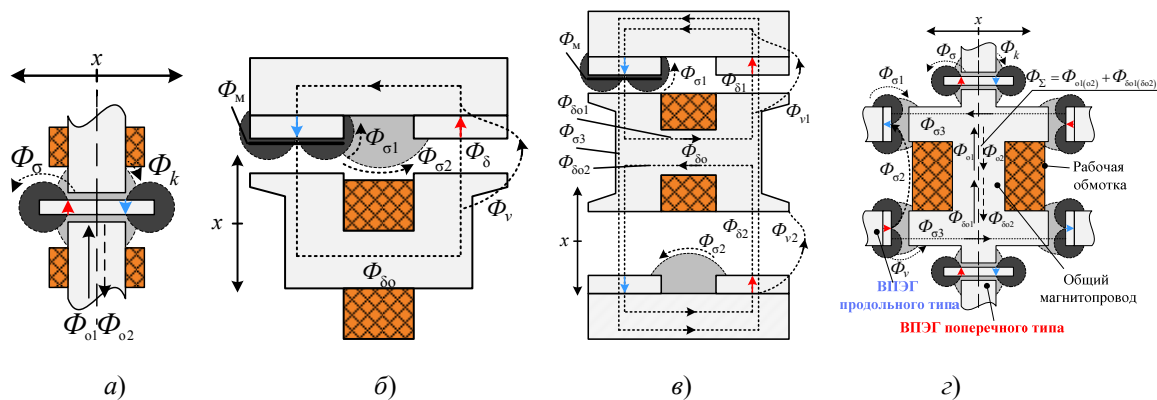


Рис. 2. Структуры магнитных систем базовых модулей ВПЭГ:
 а – поперечного типа; б – однополярного продольного типа; в – разнополярного продольного типа; г – комбинированного типа с общим МП

Так как в магнитной системе комбинированного генератора (КГ) с общим и раздельным МП существуют магнитные потоки, характерные как для ВПЭГ поперечного, так и для продольного типа, то особый интерес к исследованию распределения МП в магнитной системе представляют базовые модули ВПЭГ продольного типа (рис. 2, б, в). Основные результаты исследования распределения МП в базовых модулях ВПЭГ продольного типа при различных параметрах магнитной системы (площади поперечного сечения МП $S_{МП}$, ширины обмоточного окна Q) и величины рабочего хода $x_{ВПЭГ}^{**} = x$ генераторов представлены на рис. 3 и 4.

Из рис. 3 и 4 видно, что увеличение (уменьшение) $x_{ВПЭГ}^{**}$ при фиксированном Q приводит к увеличению (уменьшению) составляющих $\Phi_{\sigma 1}$, $\Phi_{\sigma 2}$ потока рассеяния и Φ_v потока выпучивания. А увеличение (уменьшение) Q при фиксированном $x_{ВПЭГ}^{**}$ приводит к уменьшению (увеличению) составляющей $\Phi_{\sigma 2}$ потока рассеяния и к увеличению (уменьшению) потока выпучивания Φ_v . Это говорит о том, что коэффициенты рассеяния и выпучивания магнитного потока [1] в магнитных системах ВПЭГ продольного типа зависят от $S_{МП}$, Q и $x_{ВПЭГ}^{**}$. Из рис. 3 и 4 видно, что магнитные потоки выпучивания РВПЭГ имеют такую же зависимость от геометрических размеров магнитной системы, как и в однополярных 2- и 4-полюсных генераторах продольного типа. Кроме того, в результате исследования распределения МП в базовых модулях ВПЭГ продольного типа (см. рис. 3 и 4) установлено, что влияние ширины обмоточного окна Q на распределение МП в магнитной системе разнополярного и однополярных генераторов продольного типа носит один и тот же характер. А также выявлено, что для уменьшения межполюсного потока рассеяния $\Phi_{\sigma 2}$ на начальном этапе электромагнитного расчета ВПЭГ продольного типа ширину обмоточного окна Q целесообразно выбирать из следующих условий: $Q = (0,5-0,8)b$, $x_{ВПЭГ}^{**} \geq 20$ мм; $Q = (0,8-1,5)b$, $20 \leq x_{ВПЭГ}^{**} \leq 30$ мм; $Q = (1,5-2)b$, $x_{ВПЭГ}^{**} \geq 30$ мм.

Посредством разработанной магнитостатической векторной модели МП ВПЭГ [23] получены зависимости коэффициентов рассеяния и выпучивания магнитного потока от различных соотношений ($S_{МП}$, Q и $x_{ВПЭГ}^{**}$) в магнитных системах однополярных 2- и 4-полюсных генераторов продольного типа, которые в нормированном виде представлены на рис. 5–8.

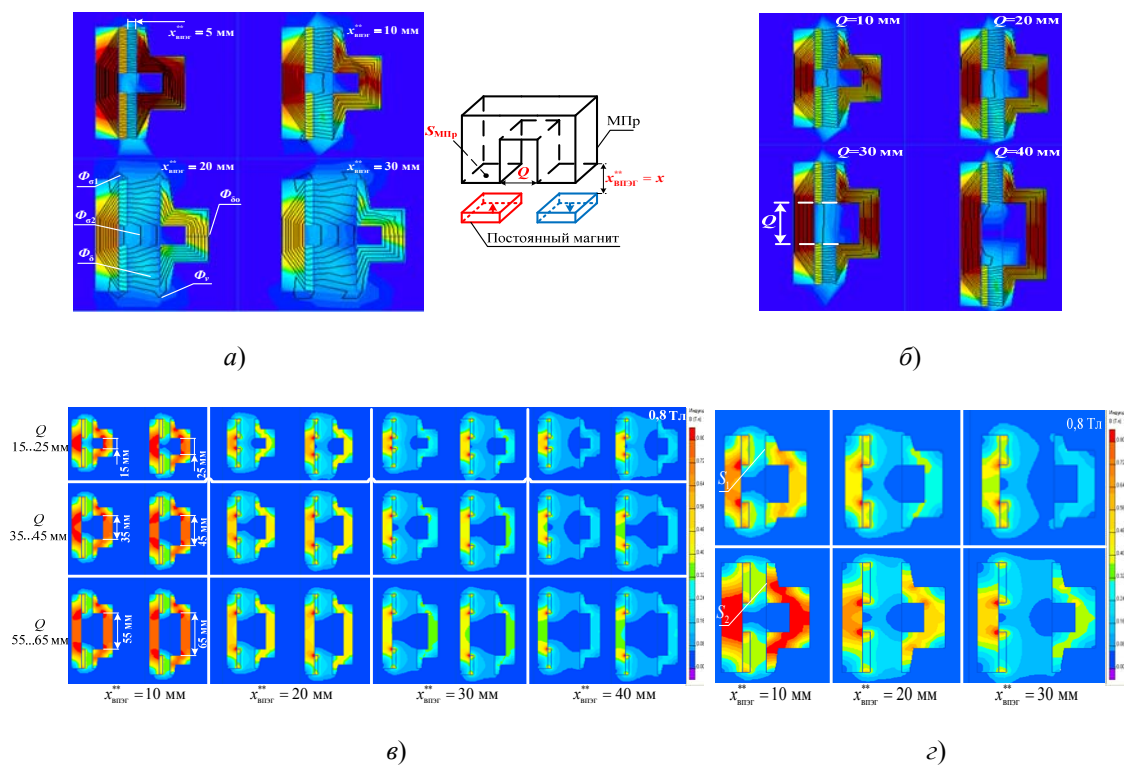


Рис. 3. Двухмерные КЭ модели МП

в однополярном 2-полюсном ВПЭГ продольного типа

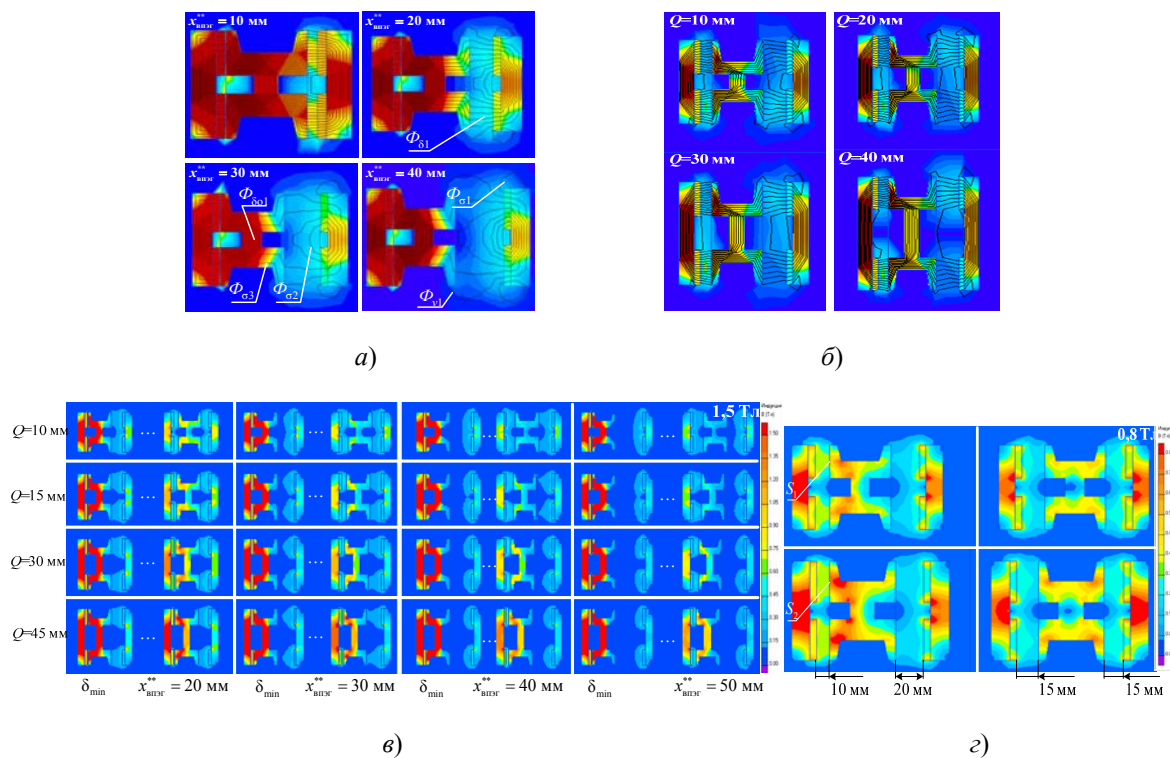
а – $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} = 5\text{--}30 \text{ мм}$; $Q = 10 \text{ мм}$; б – $Q = 10\text{--}40 \text{ мм}$; $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} = 10 \text{ мм}$;в – $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} = 10\text{--}40 \text{ мм}$; $Q = 15\text{--}65 \text{ мм}$; г – $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} = 10\text{--}30 \text{ мм}$; $S_2 > S_1$ 

Рис. 4. Двухмерные КЭ модели МП в разнополярном ВПЭГ продольного типа:

а – $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} = 10\text{--}40 \text{ мм}$; $Q = 10 \text{ мм}$; б – $Q = 10\text{--}40 \text{ мм}$; $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} = 10 \text{ мм}$;в – $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} = 20\text{--}50 \text{ мм}$; $Q = 10\text{--}45 \text{ мм}$; г – $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} = 30 \text{ мм}$; $S_2 > S_1$

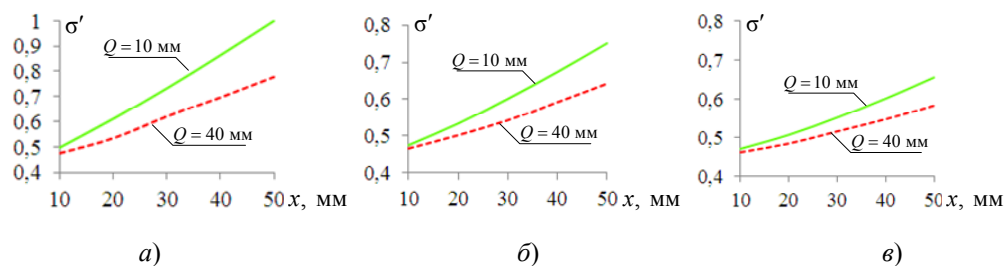


Рис. 5. Зависимости коэффициента рассеяния магнитного потока в магнитных системах однополярного 2- и 4-полюсного генераторов от величины хода подвижной части при $Q = \text{var}$:
 $a - S_{\text{МПр}} = 200 \text{ мм}^2$; $б - S_{\text{МПр}} = 784 \text{ мм}^2$; $в - S_{\text{МПр}} = 1764 \text{ мм}^2$

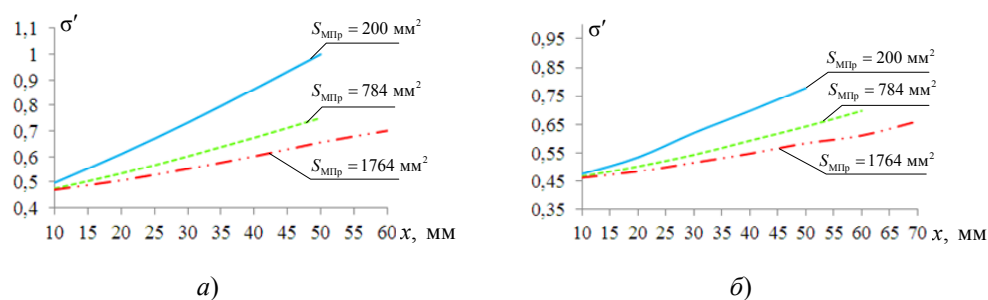


Рис. 6. Зависимости коэффициента рассеяния магнитного потока в магнитных системах однополярного 2- и 4-полюсного генераторов от величины хода подвижной части при $S_{\text{МПр}} = \text{var}$:
 $a - Q = 10 \text{ мм}$; $б - Q = 40 \text{ мм}$

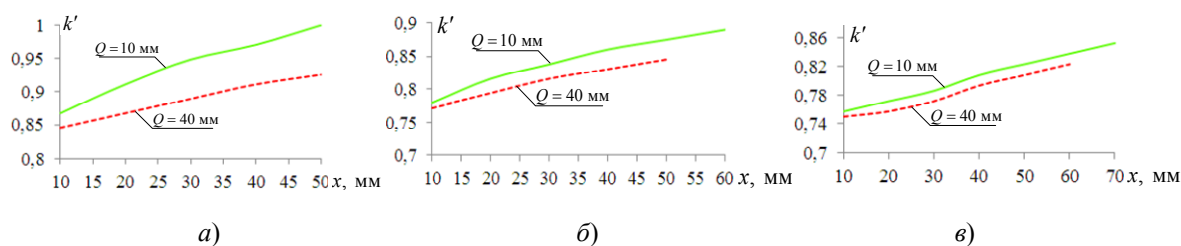


Рис. 7. Зависимости коэффициента выпучивания магнитного потока в магнитных системах однополярного 2- и 4-полюсного генераторов от величины хода подвижной части при $Q = \text{var}$:
 $a - S_{\text{МПр}} = 200 \text{ мм}^2$; $б - S_{\text{МПр}} = 784 \text{ мм}^2$; $в - S_{\text{МПр}} = 1764 \text{ мм}^2$

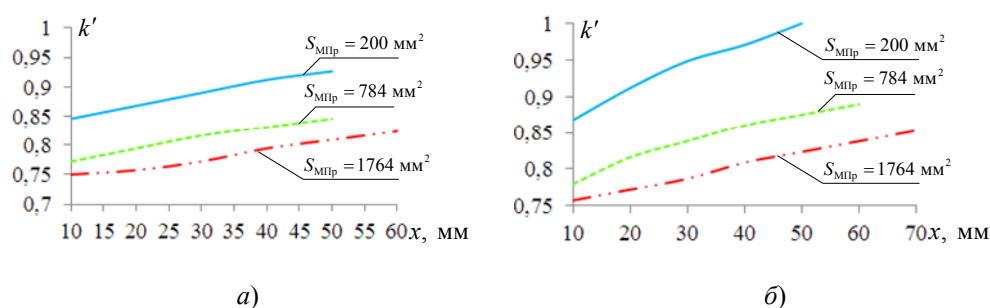


Рис. 8. Зависимости коэффициента выпучивания магнитного потока в магнитных системах однополярного 2- и 4-полюсного ВПЭГ от величины хода подвижной части при $S_{\text{МПр}} = \text{var}$:
 $a - Q = 10 \text{ мм}$; $б - Q = 40 \text{ мм}$

Из рис. 5 и 7 видно, что изменение Q от 10 до 40 мм приводит к уменьшению значения коэффициента рассеяния при $S_{МПр} = 200 \text{ мм}^2$ от 10,7 до 25,7 %, $S_{МПр} = 784 \text{ мм}^2$ – от 2 до 17 % и $S_{МПр} = 1764 \text{ мм}^2$ – от 1,8 до 11,5 %. Также уменьшается значение коэффициента выпучивания при $S_{МПр} = 200 \text{ мм}^2$ от 3,8 до 8 %, $S_{МПр} = 784 \text{ мм}^2$ – от 2,3 до 3,5 % и $S_{МПр} = 1764 \text{ мм}^2$ – от 1,6 до 1,8 %. На рис. 6 и 8 показано, что изменение $S_{МПр}$ от 200 до 1764 мм^2 приводит к уменьшению значения коэффициента рассеяния при $Q = 10 \text{ мм}$ от 10 до 56 %, а при $Q = 40 \text{ мм}$ – от 9 до 30 %. Также уменьшается значение коэффициента выпучивания при $Q = 10 \text{ мм}$ от 12,1 до 14,5 %, а при $Q = 40 \text{ мм}$ – от 9,2 до 20 %. Кроме того, из рис. 5–8 видно, что существенное влияние на значение коэффициентов рассеяния и выпучивания оказывает величина рабочего хода подвижной части генератора.

Таким образом, в результате проведенных исследований выявлено, что на начальном этапе электромагнитного расчета однополярного 2- и 4-полюсного генераторов продольного типа для уменьшения магнитных потоков рассеяния в их магнитных системах при неизменной величине перемещения подвижной части генераторов целесообразно по возможности увеличить такие параметры магнитной системы, как $S_{МПр}$ и Q .

Так как в РВПЭГ общий магнитный поток рассеяния магнитной системы дополнительно зависит от величины сквозного потока рассеяния $\Phi_{\sigma 3}$, то особый интерес к исследованию магнитных потоков рассеяния магнитной системы представляет базовый модуль ВПЭГ разнополярного продольного типа. Посредством разработанной магнитостатической векторной модели МП ВПЭГ [23] в программном продукте *Elcut* получены зависимости магнитных потоков рассеяния от различных соотношений ($S_{МПр}$, Q , x) в магнитной системе РВПЭГ (рис. 9–16).

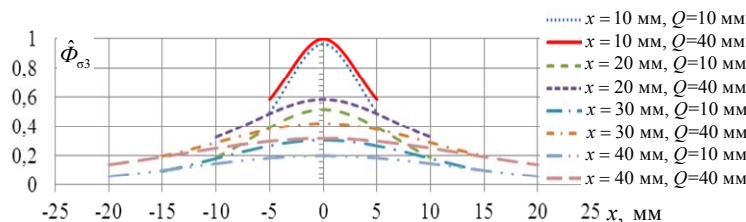


Рис. 9. Зависимости сквозного потока рассеяния магнитной системы разнополярного генератора от $x_{ВПЭГ}^{**}$ при $x = \text{var}$, $Q = \text{var}$ и $S_{МПр} = 200 \text{ мм}^2$

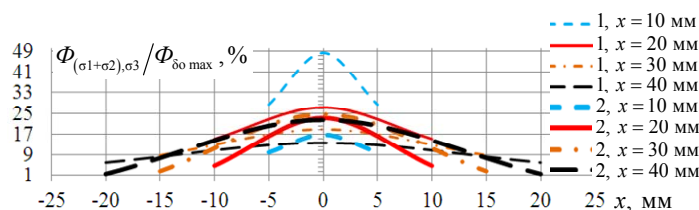


Рис. 10. Зависимости соотношения $\Phi_{\sigma 3}/\Phi_{\delta 0 \max}$ (1) и $\Phi_{(\sigma 1 + \sigma 2)}/\Phi_{\delta 0 \max}$ (2) в магнитной системе разнополярного генератора от $x_{ВПЭГ}^{**}$ при $x = \text{var}$, $Q = 40 \text{ мм}$ и $S_{МПр} = 200 \text{ мм}^2$

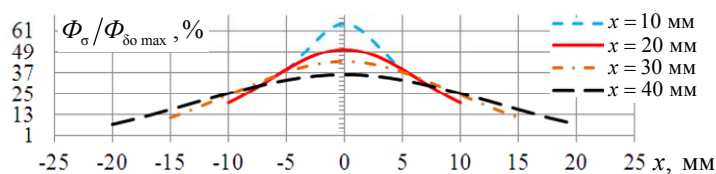


Рис. 11. Зависимости соотношений $\Phi_{\sigma}/\Phi_{\delta 0 \max}$ в магнитной системе разнополярного генератора от $x_{ВПЭГ}^{**}$ при $x = \text{var}$, $Q = 40 \text{ мм}$ и $S_{МПр} = 200 \text{ мм}^2$

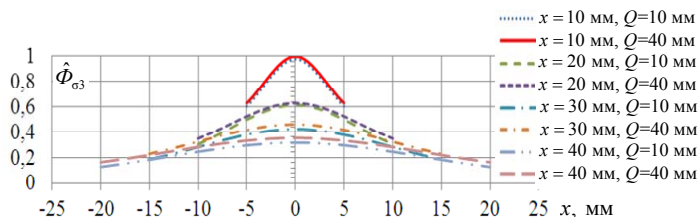


Рис. 12. Зависимости сквозного потока рассеяния магнитной системы разнополярного генератора от $x_{\text{ВПЭГ}}^{**}$ при $x = \text{var}$, $Q = \text{var}$ и $S_{\text{МПр}} = 784 \text{ мм}^2$

Из результатов математического моделирования видно (см. рис. 9 и 12), что с увеличением хода подвижной части генератора сквозной поток рассеяния в магнитной системе РВПЭГ уменьшается. Это объясняется уменьшением магнитной проводимости по пути сквозного потока рассеяния с увеличением хода подвижной части генератора. Кроме того, из рис. 9 видно, что при одной и той же величине хода подвижной части, сквозной поток рассеяния больше при большей величине Q , это объясняется тем, что с увеличением Q , уменьшается $\Phi_{\sigma 2}$ и его основная часть замыкается по пути сквозного потока рассеяния.

Из рис. 10 видно, что при $S_{\text{МПр}} = 200 \text{ мм}^2$ и $x = 10\text{--}25 \text{ мм}$ $\Phi_{\sigma 3} > (\Phi_{\sigma 1} + \Phi_{\sigma 2})$, а при $x = 25\text{--}40 \text{ мм}$ $\Phi_{\sigma 3} < (\Phi_{\sigma 1} + \Phi_{\sigma 2})$, особенно это наблюдается при малой величине x . В то время при $S_{\text{МПр}} = 784 \text{ мм}^2$ такой зависимости не наблюдается (см. рис. 13), а на всем интервале перемещения $x = 10\text{--}40 \text{ мм}$ $\Phi_{\sigma 3} > (\Phi_{\sigma 1} + \Phi_{\sigma 2})$, это объясняется тем, что с увеличением $S_{\text{МПр}}$ возрастает $\Phi_{\sigma 3}$ (рис. 15) и убывает $\Phi_{\sigma 1} + \Phi_{\sigma 2}$ (рис. 16). Из рис. 9, 10, 12, 13 и 15 видно, что $\Phi_{\sigma 3}$ принимает большое значение по отношению к $\Phi_{\delta 0 \text{ max}}$ при малой величине хода, в пределах $10\text{--}20 \text{ мм}$. Это приводит к возрастанию Φ_{σ} по отношению к $\Phi_{\delta 0 \text{ max}}$ (см. рис. 11 и 14). Поэтому РВПЭГ целесообразней всего использовать при $x = 25\text{--}40 \text{ мм}$.

Таким образом, в результате исследования распределения МП в ВПЭГ с продольным и комбинированным нелинейным изменением магнитного потока были выявлены закономерности изменения магнитных потоков рассеяния и выпучивания в магнитных системах генераторов продольного типа от параметров магнитной системы (площадь поперечного сечения МПр, ширина обмоточного окна) и величины рабочего хода генераторов. Установленные закономерности позволили выработать практические рекомендации по выбору геометрических размеров магнитной системы на начальном этапе электромагнитного расчета ВПЭГ продольного и комбинированного типов [21].

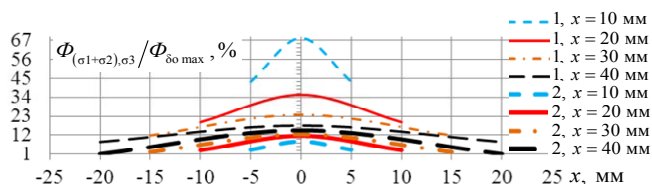


Рис. 13. Зависимости соотношения $\Phi_{\sigma 3}/\Phi_{\delta 0 \text{ max}}$ (1) и $\Phi_{\sigma 1+\sigma 2}/\Phi_{\delta 0 \text{ max}}$ (2) в магнитной системе разнополярного генератора от $x_{\text{ВПЭГ}}^{**}$ при $x = \text{var}$, $Q = 40 \text{ мм}$ и $S_{\text{МПр}} = 784 \text{ мм}^2$

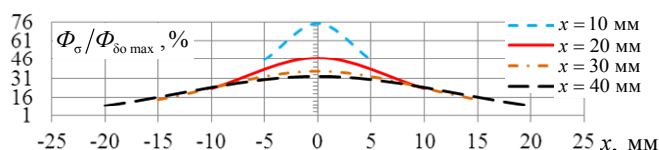


Рис. 14. Зависимости соотношений $\Phi_{\sigma}/\Phi_{\delta 0 \text{ max}}$ в магнитной системе разнополярного генератора от $x_{\text{ВПЭГ}}^{**}$ при $x = \text{var}$, $Q = 40 \text{ мм}$ и $S_{\text{МПр}} = 784 \text{ мм}^2$

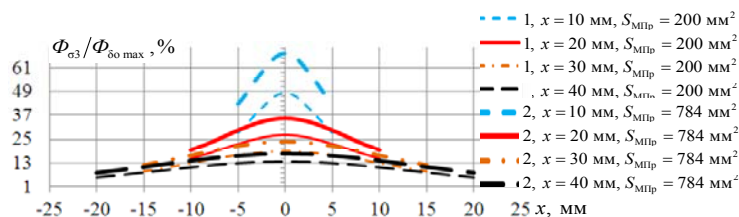


Рис. 15. Зависимости соотношений $\Phi_{\sigma 3}/\Phi_{\delta o \max}$ в магнитной системе разнополярного генератора от $x_{\text{ВПЭГ}}^{**}$ при $x = \text{var}$, $Q = 40$ мм, $S_{\text{МПр}} = 200$ мм² и $S_{\text{МПр}} = 784$ мм²

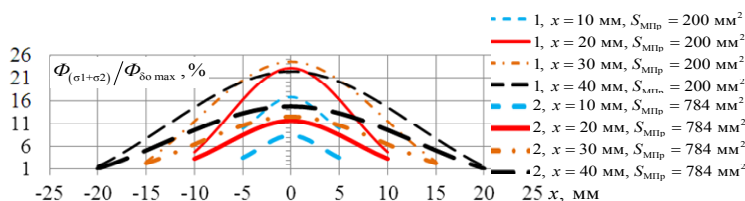


Рис. 16. Зависимости соотношений $\Phi_{(\sigma 1+\sigma 2)}/\Phi_{\delta o \max}$ в магнитной системе разнополярного генератора от $x_{\text{ВПЭГ}}^{**}$ при $x = \text{var}$, $Q = 40$ мм, $S_{\text{МПр}} = 200$ мм² и $S_{\text{МПр}} = 784$ мм²

Для выявления закономерностей изменения ЭДС движения ВПЭГ продольного и комбинированного типов от $S_{\text{МПр}}$ и кинематических параметров (скорость v_r , частота f и координата x) подвижной части генератора получен спектральный состав ЭДС движения ВПЭГ продольного и комбинированного типов при различных $S_{\text{МПр}}$, v_r , f и x (рис. 17–19). В качестве ВПЭГ комбинированного типа был рассмотрен КГ с Ж-образным МПР [23]. Амплитуда n_r -й гармоники ЭДС движения генераторов определялась по выражению [24]:

$$G(n_r) = 2T_1^{-1} \int_{-T_1/2}^{T_1/2} E e^{-jn_r \omega_1 t} dt,$$

где n_r – номер гармоники; T_1 – период повторения ЭДС движения генераторов по первой гармонике; ω_1 – угловая частота первой гармоники.

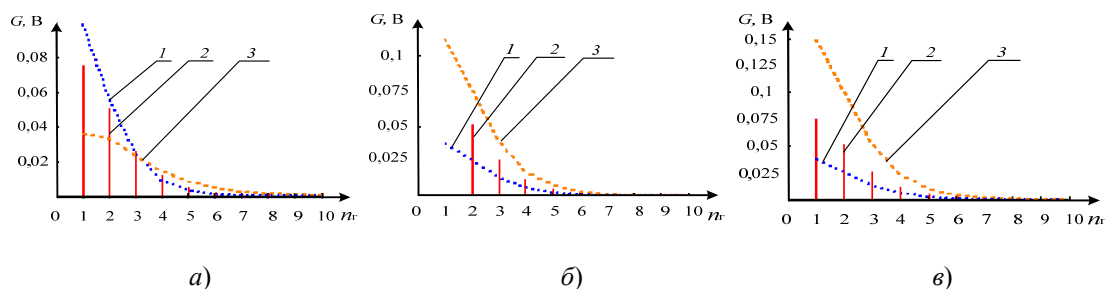


Рис. 17. Спектр ЭДС движения однополярного 2-полюсного генератора продольного типа:

- а – 1 – при $x = 10$ мм, $f = 200$ Гц; 2 – при $x = 14$ мм, $f = 142,9$ Гц;
3 – при $x = 30$ мм, $f = 66,6$ Гц ($S_{\text{МПр}} = 200$ мм² – const; $v_r = 4$ м/с – const);
- б – 1 – при $S_{\text{МПр}} = 100$ мм²; 2 – при $S_{\text{МПр}} = 200$ мм²;
3 – при $S_{\text{МПр}} = 300$ мм² ($x = 14$ мм – const; $f = 142,9$ Гц – const; $v_r = 4$ м/с – const);
- в – 1 – при $f = 71,4$ Гц, $v_r = 2$ м/с; 2 – при $f = 142,9$ Гц, $v_r = 4$ м/с;
3 – при $f = 285,7$ Гц, $v_r = 8$ м/с ($x = 14$ мм – const; $S_{\text{МПр}} = 200$ мм² – const)

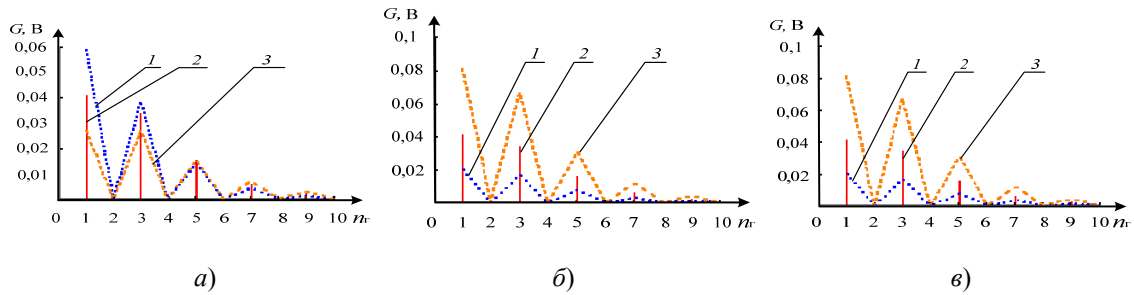


Рис. 18. Спектр ЭДС движения разнополярного генератора продольного типа:
 а – 1 – при $x = 30$ мм, $f = 66,6$ Гц; 2 – при $x = 42$ мм, $f = 47,7$ Гц; 3 – при $x = 60$ мм, $f = 33,3$ Гц ($S_{\text{МПР}} = 200 \text{ мм}^2 - \text{const}$; $v_r = 4 \text{ м/с} - \text{const}$);
 б – 1 – при $S_{\text{МПР}} = 100 \text{ мм}^2$; 2 – при $S_{\text{МПР}} = 200 \text{ мм}^2$; 3 – при $S_{\text{МПР}} = 400 \text{ мм}^2$ ($x = 42 \text{ мм} - \text{const}$; $f = 47,6 \text{ Гц} - \text{const}$; $v_r = 4 \text{ м/с} - \text{const}$);
 в – 1 – при $f = 23,8$ Гц, $v_r = 2 \text{ м/с}$; 2 – при $f = 47,7$ Гц, $v_r = 4 \text{ м/с}$; 3 – при $f = 95,4$ Гц, $v_r = 8 \text{ м/с}$ ($x = 42 \text{ мм} - \text{const}$; $S_{\text{МПР}} = 200 \text{ мм}^2 - \text{const}$)

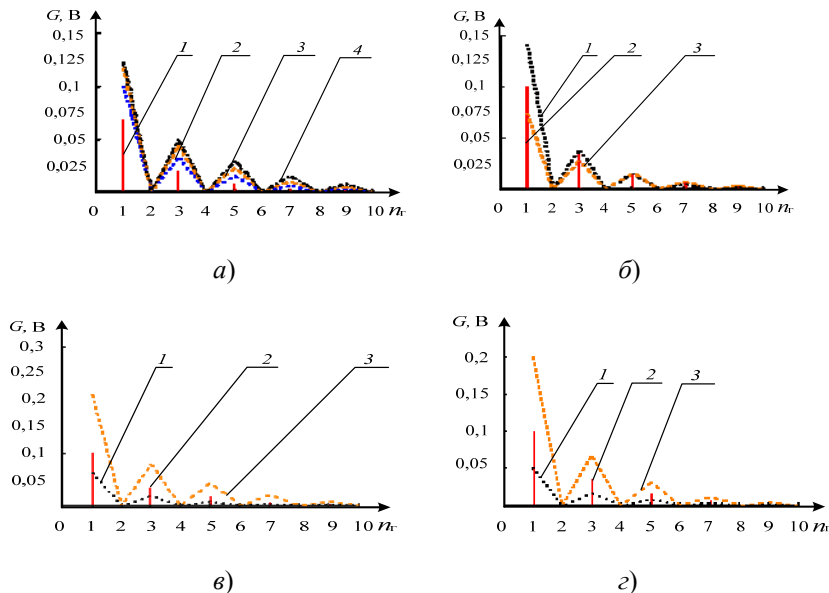


Рис. 19. Спектр ЭДС движения КГ с Ж-образным МПР:
 а – 1 – при $x = 30$ мм, $S_{\text{МПР ВПЭГ попер.типа}} / S_{\text{МПР ВПЭГ прод.типа}} = 100/200 \text{ мм}^2$, $f = 66,6$ Гц;
 2 – при $x = 42$ мм, $S_{\text{МПР ВПЭГ попер.типа}} / S_{\text{МПР ВПЭГ прод.типа}} = 200/400 \text{ мм}^2$, $f = 47,6$ Гц;
 3 – при $x = 53$ мм, $S_{\text{МПР ВПЭГ попер.типа}} / S_{\text{МПР ВПЭГ прод.типа}} = 300/600 \text{ мм}^2$, $f = 37,7$ Гц;
 4 – при $x = 68$ мм, $S_{\text{МПР ВПЭГ попер.типа}} / S_{\text{МПР ВПЭГ прод.типа}} = 400/800 \text{ мм}^2$, $f = 29,4$ Гц ($v_r = 4 \text{ м/с} - \text{const}$);
 б – 1 – при $x = 30$ мм, $f = 66,6$ Гц; 2 – при $x = 42$ мм, $f = 47,6$ Гц; 3 – при $x = 60$ мм, $f = 33,3$ Гц ($S_{\text{МПР ВПЭГ попер.типа}} / S_{\text{МПР ВПЭГ прод.типа}} = 200 / 400 \text{ мм}^2 - \text{const}$; $v_r = 4 \text{ м/с} - \text{const}$);
 в – 1 – при $S_{\text{МПР ВПЭГ попер.типа}} / S_{\text{МПР ВПЭГ прод.типа}} = 100/200 \text{ мм}^2$;
 2 – при $S_{\text{МПР ВПЭГ попер.типа}} / S_{\text{МПР ВПЭГ прод.типа}} = 200/400 \text{ мм}^2$;
 3 – при $S_{\text{МПР ВПЭГ попер.типа}} / S_{\text{МПР ВПЭГ прод.типа}} = 400/800 \text{ мм}^2$ ($x = 42 \text{ мм} - \text{const}$; $f = 47,6 \text{ Гц} - \text{const}$; $v_r = 4 \text{ м/с} - \text{const}$);
 г – 1 – при $f = 23,8$ Гц, $v_r = 2 \text{ м/с}$; 2 – при $f = 47,6$ Гц, $v_r = 4 \text{ м/с}$; 3 – при $f = 95,4$ Гц, $v_r = 8 \text{ м/с}$ ($x = 42 \text{ мм} - \text{const}$; $S_{\text{МПР ВПЭГ попер.типа}} / S_{\text{МПР ВПЭГ прод.типа}} = 200/400 \text{ мм}^2 - \text{const}$)

Из результатов математического моделирования (см. рис. 17–19) выявлено: увеличение перемещения подвижной части генератора при неизменных v_r и $S_{\text{МПР}}$ приводит к увеличению амплитуды высших гармоник в спектре ЭДС движения, что искажает форму ЭДС движения и увеличивает потери в МПР; изменение $S_{\text{МПР}}$ при неизменных v_r и x или изменение v_r при неизменных $S_{\text{МПР}}$ и x приводит к пропорциональному изменению амплитуды всех гармоник спектра ЭДС движения, не изменяя форму ЭДС.

На рис. 20 показано, что отношение эффективной величины перемещения ВПЭГ продольного типа x_n , при котором $\hat{E}_x > \hat{E}_y$, к величине перемещения ВПЭГ поперечного типа y_n , при котором $\hat{E}_x < \hat{E}_y$, в зависимости от соотношения максимальных значений потокосцеплений генераторов $\hat{\Psi}_{x \max} / \hat{\Psi}_{y \max}$ носит переменный характер. Из рис. 20 видно, что изменяя соотношение $\hat{\Psi}_{x \max} / \hat{\Psi}_{y \max}$ на 10 %, изменение соотношения x_n / y_n составит 3–4 %. Таким образом, регулируя соотношение $\hat{\Psi}_{x \max} / \hat{\Psi}_{y \max}$, появляется возможность изменять величину эффективного интервала работы ВПЭГ продольного типа x_n по отношению к рабочему интервалу ВПЭГ поперечного типа y_n . Кроме того, в результате проведенных исследований выявлено, что изменение соотношения $\hat{\Psi}_{x \max} / \hat{\Psi}_{y \max}$ ВПЭГ продольного и поперечного типов приводит к изменению соотношения выходных мощностей генераторов.

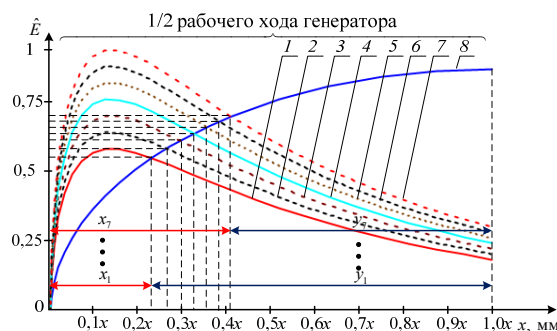


Рис. 20. Зависимости ЭДС движения ВПЭГ продольного и поперечного типов от $x_{\text{ВПЭГ}}^{**}$:

$$\hat{\Psi}_{\max 1} < \hat{\Psi}_{\max 2} < \hat{\Psi}_{\max 3} < \hat{\Psi}_{\max 4} < \hat{\Psi}_{\max 5} < \hat{\Psi}_{\max 6} < \hat{\Psi}_{\max 7}$$

Также при выявлении закономерностей изменения ЭДС движения ВПЭГ продольного типа от площади поперечного сечения МПр $S_{\text{МПр}}$ и величины рабочего хода подвижной части генератора x интерес представляют зависимости ЭДС движения однополярного 2-полюсного генератора продольного типа от $x_{\text{ВПЭГ}}^{**}$ при разных максимальных значениях потокосцепления с рабочей обмоткой $\hat{\Psi}_{\max}$ и величине рабочего хода подвижной части генератора от 10 до 40 мм (рис. 21).

Анализ результатов математического моделирования (см. рис. 21) показал, что увеличение рабочего хода подвижной части однополярного 2-полюсного генератора продольного типа с 10 до 20 мм приводит к изменению мгновенного значения ЭДС движения на 64,4 %, с 20 до 30 мм – на 46,8 % и с 30 до 40 мм – на 40,3 %. Это говорит о том, что увеличение интервала перемещения подвижной части генератора продольного типа при $v_r = \text{const}$ приводит к уменьшению ЭДС движения, наводимой в рабочей обмотке генератора. Кроме того, из результатов математического моделирования (см. рис. 21) видно, что в зависимости от максимального значения потокосцепления с рабочей обмоткой $\hat{\Psi}_{\max}$ интервал (величина рабочего хода) эффективного применения однополярных генераторов продольного типа может достигать 40 мм. На рис. 21 показано, что увеличить ЭДС движения при увеличении величины рабочего хода подвижной части генератора возможно за счет увеличения максимального значения потокосцепления с рабочей обмоткой. Максимальное значение потокосце-

пления с рабочей обмоткой зависит от $S_{МПр}$, количества витков рабочей обмотки w , свойств постоянного магнита (ПМ) и конструктивного исполнения магнитной системы генератора. Увеличение w или $S_{МПр}$, а следовательно и площади сечения ПМ генератора, увеличивает выходную мощность генератора, но кроме того, увеличение w приводит к уменьшению КПД и увеличению массы генератора. Увеличение $S_{МПр}$ генератора также приводит к увеличению массы генератора. В результате этого возникает необходимость решения задачи нахождения оптимального соотношения между w и $S_{МПр}$ в магнитной системе генератора, при котором обеспечивается минимум удельной массы генератора с заданным КПД.

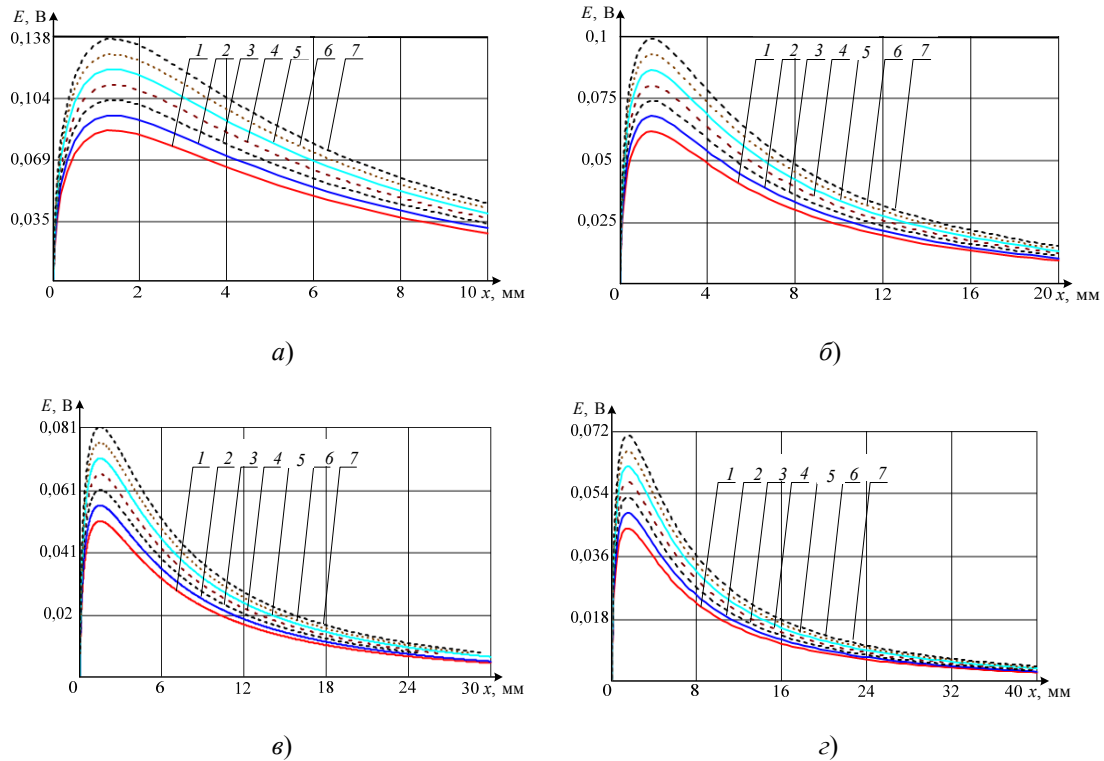


Рис. 21. Зависимости ЭДС движения однополярного 2-полюсного ВПЭГ продольного типа от $x_{ВПЭГ}^{**}$ при рабочем ходе генератора: а – 10 мм; б – 20 мм; в – 30 мм; г – 40 мм:

$$\hat{\Psi}_{\max 1} < \hat{\Psi}_{\max 2} < \hat{\Psi}_{\max 3} < \hat{\Psi}_{\max 4} < \hat{\Psi}_{\max 5} < \hat{\Psi}_{\max 6} < \hat{\Psi}_{\max 7}$$

Для выявления закономерностей изменения удельной массы и КПД ВПЭГ продольного типа от параметров магнитной системы ($S_{МПр}$, w) на основании универсальной методики электромагнитного расчета магнитоэлектрических ВПЭГ [21] получены зависимости удельной массы $\hat{M}_{уд}$ и КПД $\hat{\eta}$ ВПЭГ продольного типа от w и $S_{МПр}$, которые в нормированном виде представлены на рис. 22. Условия построения зависимостей: плотность тока ($J = 1 \cdot 10^7 \text{ А/м}^2$), максимальное значение магнитной индукции в МПр ($B_{st \max} = 1,8 \text{ Тл}$), активная мощность генератора ($P_r = \text{var}$).

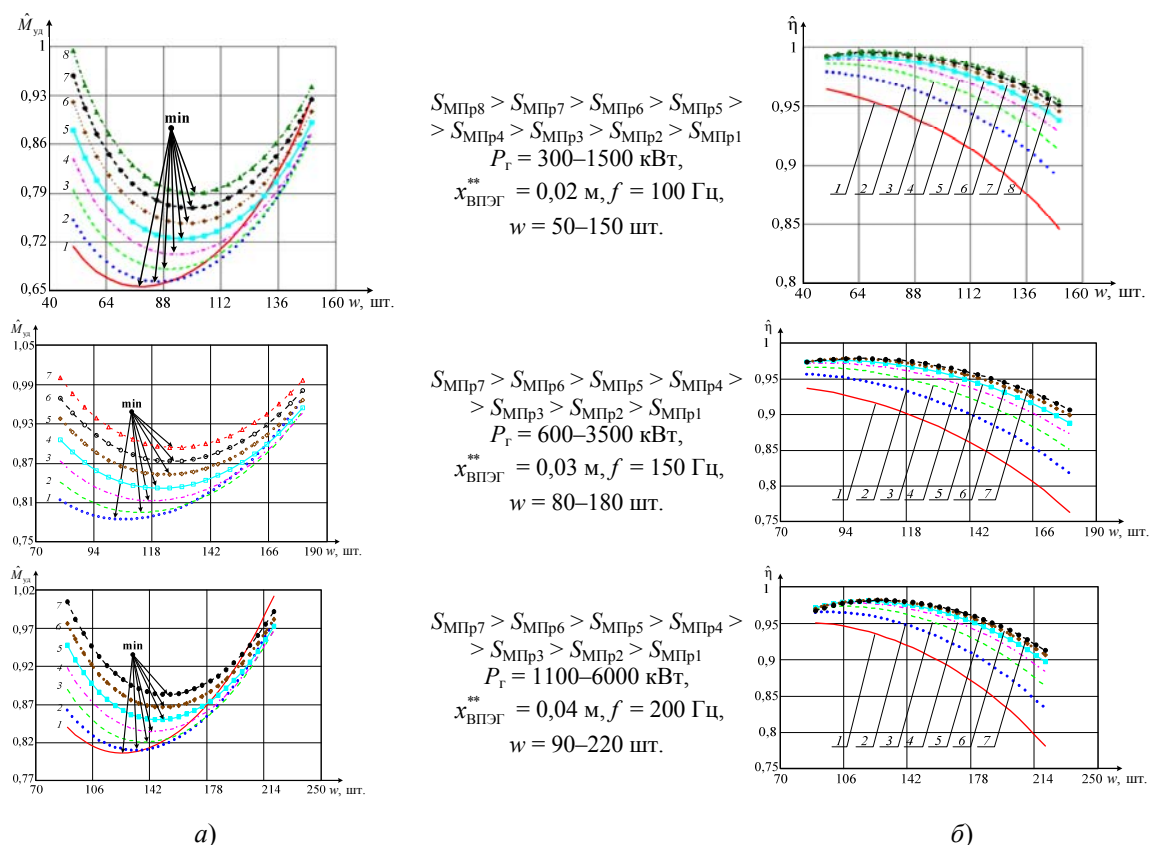


Рис. 22. Зависимости от w : а – удельной массы; б – КПД ВПЭГ продольного типа

Из результатов математического моделирования (см. рис. 22) видно, что между $S_{МП}$ и w существует некоторое оптимальное соотношение, при котором удельная масса ВПЭГ продольного типа может достигать минимального значения с заданным КПД генератора. Это говорит о необходимости решения задачи параметрического синтеза генераторов продольного и комбинированного типов на этапе их электромагнитного расчета [25].

Кроме того, при исследовании зависимости удельной массы ВПЭГ продольного типа от параметров генератора было выявлено, что его удельная масса ограничена величиной перемещения подвижной части и мощностным диапазоном генератора. Результаты расчета удельной массы ВПЭГ продольного типа в нормированном виде представлены на рис. 23. Расчеты удельной массы ВПЭГ продольного типа проводились при условиях: $J = 1 \cdot 10^7 \text{ А/м}^2$; $B_{st \max} = 1,8 \text{ Тл}$; $v_r = 8 \text{ м/с}$; $x = \text{var}$; $P_r = \text{var}$.

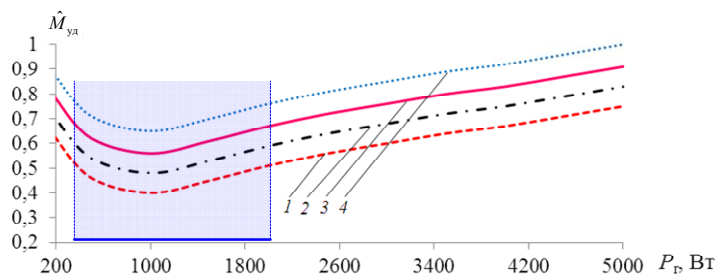


Рис. 23. Зависимости удельной массы ВПЭГ продольного типа от P_r :
 1 – 10 мм; 2 – 20 мм; 3 – 30 мм; 4 – 40 мм

Из рис. 23 видно, что удельная масса ВПЭГ продольного типа ограничена величиной перемещения подвижной части генератора и что существует мощностной диапазон (300–2000 Вт) ВПЭГ продольного типа, при котором достигается наименьшая удельная масса генератора. Выявление такой закономерности способствует построению модульной структуры КГ [25].

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований электромагнитных процессов в ВПЭГ с продольным и комбинированным нелинейным изменением магнитного потока выявлены: закономерности изменения магнитных потоков рассеяния и выпучивания в магнитной системе ВПЭГ продольного типа от параметров магнитной системы (площади поперечного сечения МПр, ширины обмоточного окна) и величины рабочего хода генераторов; закономерности изменения ЭДС движения ВПЭГ продольного и комбинированного типов от площади поперечного сечения МПр и кинематических параметров (скорости, частоты и координаты) подвижной части генератора; закономерности изменения удельной массы и КПД ВПЭГ продольного типа от параметров магнитной системы (площади поперечного сечения МПр, числа витков рабочей обмотки), величины рабочего хода и активной мощности генератора.

Установленные закономерности позволили выработать практические рекомендации по выбору геометрических размеров магнитной системы на начальном этапе электромагнитного расчета генераторов продольного и комбинированного типов [21], а также определить эффективные условия их применения (величину рабочего хода, мощностной диапазон). Это позволяет сократить затраты на создание генераторов за счет ускорения и снижения стоимости процессов проектирования и экспериментальной доработки генераторов.

Результаты исследования электромагнитных процессов в ВПЭГ с продольным и комбинированным нелинейным изменением магнитного потока практически использованы при разработке технического облика мобильной быстроразвертываемой платформы МБРП-30-200, принятой на вооружение Вооруженных Сил Республики Беларусь (приказ Министра обороны Республики Беларусь № 1551 от 19 октября 2018 г.), что подтверждено актом о практическом использовании результатов исследования, выданным открытым акционерным обществом «ВОЛАТАВТО» от 05.02.2018 г.

Литература

1. Хитерер, М. Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения : учеб. пособие / М. Я. Хитерер, И. Е. Овчинников. – СПб. : Корона принт, 2013. – 357 с.
2. Бабилова, Н. Л. К вопросу о классификации линейных электрических генераторов / Н. Л. Бабилова, Р. Р. Саттаров, Е. А. Полихач // Вестн. Уфим. гос. авиац. техн. ун-та. – 2009. – Т. 12, № 2. – С. 144–149.
3. Сергеенкова, Е. В. Синхронная электрическая машина возвратно-поступательного движения (генератор) : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01 / Е. В. Сергеенкова. – М., 2011. – 118 л.
4. Сеницин, А. П. Совершенствование линейных генераторов с постоянными магнитами для автономных объектов : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01 / А. П. Сеницин. – Самара, 2013. – 124 л.
5. Тарашев, С. А. Вентильный линейный генератор для систем электропитания автономных объектов : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01 / С. А. Тарашев. – Самара, 2011. – 129 л.

6. Высоцкий, В. Е. Линейный генератор с постоянными магнитами для систем электропитания автономных объектов / В. Е. Высоцкий, С. А. Тарашев, А. П. Сеницин // Изв. вузов. Электромеханика. – 2010. – № 1. – С. 80–82.
7. Cawthorne, W. R. Optimization of a Brushless Permanent Magnet Linear Alternator for Use with a Linear Internal Combustion Engine / W. R. Cawthorne. – Morgantown, 1999. – 113 p.
8. Пинский, Ф. И. Энергоустановки со свободнопоршневыми двигатель-генераторами / Ф. И. Пинский // Бортвая энергетика. – 2004. – № 2. – С. 13–17.
9. Cawthorne, W. R. Optimization of a Brushless Permanent Magnet Linear Alternator for Use with a Linear Internal Combustion Engine / W. R. Cawthorne. – Morgantown, 1999. – 113 p.
10. Темнов, Э. С. Разработка теоретических основ расчета и конструирования мало-размерных двигатель – генераторных установок как единой динамической системы : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02 / Э. С. Темнов. – Тула, 2005. – 134 л.
11. Петриченко, Д. А. Подход к электромеханическому управлению крайними положениями поршня в свободнопоршневом генераторе / Д. А. Петриченко, Л. Ю. Лежнев // Достижения вуз. науки. – 2014. – № 12. – С. 109–117.
12. Татарников, А. П. Разработка свободнопоршневой энергоустановки на базе двухтактного двигателя и линейных электрических машин / А. П. Татарников // Новая наука: стратегии и векторы развития. – 2016. – № 5-2. – С. 256–265.
13. Dynamic modeling of a SI/HCCI free-piston engine generator with electric mechanical valves / C. J. Chiang [et al.] // Appl. Energy. – 2013. – Vol. 102. – P. 336–346.
14. Recent commercial free-piston engine developments for automotive applications / M. R. Hanipah [et al.] // Appl. Thermal Engineering. – 2015. – Vol. 75. – P. 493–503.
15. Li, Q. F. Simulation of a two-stroke free-piston engine for electrical power generation / Q. F. Li, J. Xiao, Z. Huang // Energy & Fuels. – 2008. – Vol. 22, № 5. – P. 3443–3449.
16. Multi-dimensional scavenging analysis of a free-piston linear alternator based on numerical simulation / J. L. Mao [et al.] // Appl. Energy. – 2011. – Vol. 88, № 4. – P. 1140–1152.
17. The operation of free piston linear generator engine using MOSFET and IGBT drivers / A. A. Ibrahim [et al.] // J. of Appl. Sciences. – 2011. – Vol. 11, № 10. – P. 1791–1796.
18. Mikalsen, R. The control of a free-piston engine generator. Part 2: Engine dynamics and piston motion control / R. Mikalsen, A. Roskilly // Appl. Energy. – 2010. – Vol. 87, № 4. – P. 1281–1287.
19. The free-piston linear generator potentials and challenges / F. Kock [et al.] // MTZ Worldwide. – 2013. – Vol. 74, № 10. – P. 38–43.
20. Менжинский, А. Б. Применение возвратно-поступательного генератора комбинированной конструкции для повышения КПД и уменьшения удельной массы энергоустановок автономных образцов вооружения / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, И. В. Митянов // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2017. – № 4. – С. 62–72.
21. Менжинский, А. Б. Универсальная методика электромагнитного расчета возвратно-поступательных электрических генераторов с поперечным и продольным нелинейным изменением магнитного потока / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, Ю. Г. Коваль // Изобретатель. – 2019. – № 5/6 (233, 234). – С. 38–48.
22. Сафонов, В. А. Термомеханический двигатель с линейным генератором, работающий по циклу стирлинга / В. А. Сафонов, И. Л. Белецкий, П. Н. Кузнецов // Авиац.-косм. техника и технология. – 2014. – № 4. – С. 60–62.

23. Менжинский, А. Б. Математическая модель генератора комбинированной конструкции возвратно-поступательного типа / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, Ю. Г. Коваль // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2018. – № 2. – С. 74–85.
24. Теория электрорадиоцепей: спектральный (частотный) метод анализа электрических цепей : пособие / А. Н. Малашин [и др.]. – Минск : Воен. акад. Респ. Беларусь, 2015. – 94 с.
25. Менжинский, А. Б. Методика структурно-параметрического синтеза комбинированного генератора возвратно-поступательного типа для энергоустановок робототехнических комплексов на базе свободнопоршневого двигателя / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 2. – С. 229–243.

Получено 12.09.2019 г.