

УДК 621.313.17

**А.Д.Подольцев**, докт.техн.наук (Ин-т электродинамики НАН Украины, Киев), **В.В.Козырский**, докт.техн.наук, **А.В.Петренко** (Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев)

## АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОДНОФАЗНОМ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ЛИНЕЙНОМ ГЕНЕРАТОРЕ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

*Разработана Simulink-модель для анализа динамических процессов и эффективности энергопреобразования в однофазном магнитоэлектрическом линейном генераторе возвратно-поступательного движения. Показано, что для получения синусоидального напряжения холостого хода генератора необходимо осуществлять колебание ротора с амплитудой, равной половине полюсного шага. Рассмотрены условия оптимального согласования генератора с активной нагрузкой и использования емкости для компенсации реактивной мощности в нагрузочной цепи.*

*Розроблено Simulink-модель для аналізу динамічних процесів та ефективності енергоперетворення в однофазному магнітоелектричному лінійному генераторі зворотно-поступального руху. Показано, для одержання синусоїдальної форми напруги холостого ходу руху генератора необхідно здійснювати коливання ротора з амплітудою, що дорівнює половині полюсного кроку. Розглянуто умови оптимальної відповідності генератора з активним навантаженням та використання ємності для компенсації реактивної потужності в колі навантаження.*

В последнее десятилетие непрерывно возрастает доля нетрадиционных возобновляемых источников энергии в общем энергетическом балансе развитых стран. При разработке новых технических решений, направленных на преобразование механической энергии ветра и морских волн в электрическую, линейные электрические генераторы рассматриваются как перспективные электро-

механические преобразователи энергии [2–5]. Из различных видов существующих электрических генераторов целесообразно выделить генераторы с постоянными магнитами – магнитоэлектрические линейные генераторы (МЭЛГ), которые характеризуются наиболее высокими удельными показателями и на основе которых уже разработаны нетрадиционные источники электрической энергии [6,7]. Отсутствие серийного производства таких генераторов и конкретных рекомендаций по их проектированию (особенно в случае возвратно-поступательного движения) обуславливает необходимость проведения научных исследований, направленных на поиск оптимальных конструктивных решений и анализ динамических характеристик таких линейных генераторов. Целью данной работы является разработка методики расчета и численный анализ динамических процессов в однофазном цилиндрическом магнитоэлектрическом линейном генераторе, показанном на рис.1.

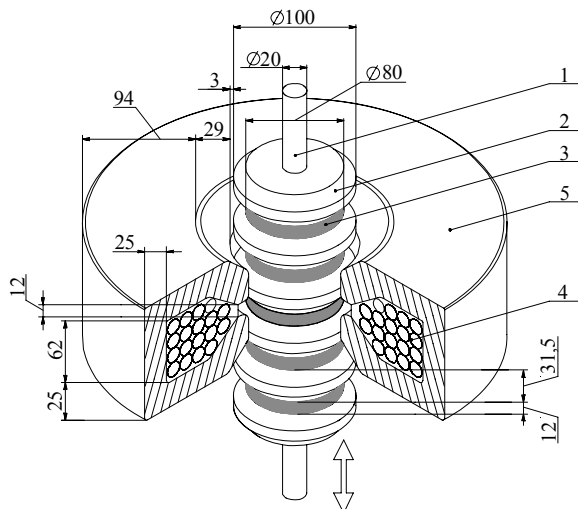


Рис. 1

Генератор содержит подвижный элемент (ро-

тор), состоящий из немагнитного стержня 1, ферро-магнитных элементов 2, постоянных магнитов NdFeB 3, и неподвижный элемент (статор), содержащий однофазную обмотку 4, окруженную магнитопроводом статора 5, выполненным из шихтованной стали. Предполагается, что ротор генератора связан с вращающимся валом ротора ветродвигателя с помощью кривошипно-шатунного механизма и совершает возвратно-поступательное движение. При этом используются методы теории электрических цепей для численного расчета переходных и установившихся процессов в электрической цепи генератора и анализа его энергетических и динамических характеристик.

**Расчет магнитного поля и электрических параметров линейного генератора.** Для расчета

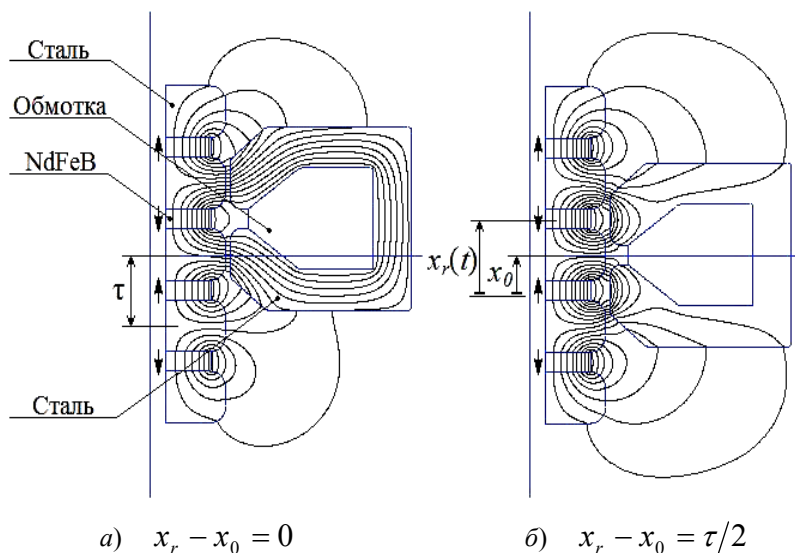


Рис. 2

величины магнитного потока, создаваемого постоянными магнитами и сцепленного с обмоткой статора, а также зависимости индуктивности обмотки статора от положения ротора (характеризуется координатой  $x_r(t)$  на рис. 2, б) выполнялся расчет магнитного поля в активной зоне линейного генератора методом конечных элементов. При этом использовались следующие упрощающие допущения:

- магнитные свойства магнитопровода статора и массивных полюсов ротора не зависят от величины магнитного поля, т.е. не учитывается насыщение магнитопровода;
- магнитный материал является изотропным;

– из-за низкой частоты тока в обмотке статора – менее 10 Гц, влиянием вихревых токов в статоре и роторе можно пренебречь и рассматривать полевую задачу в магнитостатическом приближении.

Конструкция генератора характеризуется осевой симметрией, что позволяет рассматривать полевую задачу как двумерную в цилиндрической системе координат в плоскости  $roz$ . При этом основной полевой величиной является векторный магнитный потенциал  $\mathbf{A}$ , имеющий единственную  $\varphi$ -компоненту, т.е.  $\mathbf{A} = (0, A_\varphi, 0)$ .

Из системы дифференциальных уравнений Максвелла для стационарного магнитного поля вида

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_e, \quad \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \quad \nabla \cdot \mathbf{A} = 0 \quad (1)$$

и уравнения состояния для магнитного материала в виде

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} + \mathbf{B}_r \quad (2)$$

получим следующее уравнение для определения векторного потенциала

$$\nabla \times [(\mu_0 \mu_r)^{-1} \nabla \times \mathbf{A} - (\mu_0 \mu_r)^{-1} \mathbf{B}_r] = \mathbf{J}_e. \quad (3)$$

Здесь  $\mathbf{H}$  – напряженность магнитного поля,  $\mathbf{B}$  – магнитная индукция,  $\mathbf{J}_e$  – плотность тока в обмотке статора – считается известной величиной,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума,  $\mu_r$  – относительное значение магнитной проницаемости материала.

Постоянные магниты на роторе выполнены на основе материала NdFeB марки 38SH, характеризующегося остаточной индукцией  $B_r = 1,26$  Тл и коэрцитивной силой  $H_{CB} = 950$  кА/м. Отсюда для уравнения состояния для постоянного магнита (2) после подстановки этих значений получим –  $\mu_r = 1,08$ .

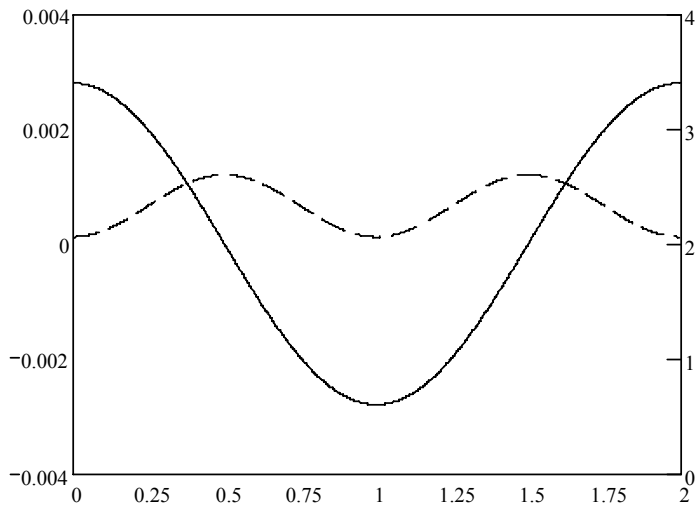


Рис. 3

Результаты расчета поля постоянных магнитов (при условии, что плотность тока в катушке  $J_e = 0$ ) показаны на рис. 2 для двух положений ротора. По результатам расчетов поля определялась зависимость величины потока обмотки статора от положения ротора

$$\Phi_{PM} = \frac{1}{S} \int_S A_\varphi 2\pi r dS,$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения обмотки. Расчетная зависимость этого потока от положения ротора (задается координатой  $x_r$ , согласно рис. 2, б) показана на рис. 3. Из рисунка видно, что зависимость  $\Phi_{PM}(x_r)$  может быть аппроксимирована гармоническим выражением вида

$$\Phi_{PM}(x_r) = \Phi_{\max} \cos[\pi(x_r - x_0)/\tau], \quad (4)$$

где максимальное значение потока  $\Phi_{\max} = 0,0033$  Вб, а  $x_0$  – положение статора согласно рис. 2, б.

Для расчета индуктивности обмотки статора при различном положении ротора выполнялся расчет магнитного поля при заданном постоянном токе в обмотке статора  $i = 1$  А и при условии отсутствия постоянных магнитов (для области магнитов в (2) полагалось  $B_r = 0$ ). Величина индуктивности вычислялась на основании следующего выражения

$$L(x_r) = \frac{\Psi}{i} = \frac{w}{Si} \int_S A_\varphi 2\pi r dS, \quad (5)$$

где  $w$  – число витков в обмотке статора. Расчетная зависимость этой индуктивности в случае  $w = 1$  приведена на рис. 3 и может быть аппроксимирована как

$$L(x_r) = L_0 - L_m \cos[2\pi(x_r - x_0)/\tau],$$

где

$$L_0 = 0,5(L_d + L_q), \quad L_m = 0,5(L_d - L_q). \quad (6)$$

Здесь  $L_d = 2,6$  мкГн,  $L_q = 2,05$  мкГн – индуктивность обмотки по продольной и поперечной оси соответственно. Полученные из решения полевой задачи выражения для потока (4) и индуктивности (6) необходимы для анализа динамических процессов в генераторе.

**Моделирование динамических процессов в генераторе.** В отличие от традиционных линейных электрических машин поступательного движения, подвижный элемент исследуемого генератора совершает возвратно-поступательное движение, т.е. при движении якоря существуют моменты времени, соответствующие верхнему и нижнему его положению, в которых он неподвижен по отношению к статору. В этих точках не происходит электромеханического преобразования энергии, что накладывает свои особенности на форму кривой напряжения холостого хода генератора и на протекание динамических процессов в системе "генератор – нагрузка". Рассмотрим с учетом этих особенностей протекание электромагнитных процессов в генераторе, используя средства компьютерного моделирования и, в частности, программу Matlab/Simulink.

Уравнение баланса напряжений в цепи генератора при работе на активную нагрузку  $R_H$  и при условии, что его ротор перемещается по известному закону  $x_r(t)$ , имеет следующий вид:

$$d\Psi/dt + i(R_0 + R_H) = 0, \quad (7)$$

где  $\Psi = L(x_r)i + \Psi_{PM}(x_r)$ .

Отсюда получим следующее дифференциальное уравнения для определения тока в цепи генератора

$$L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dx_r} \frac{dx_r}{dt} + \frac{d\Psi_{PM}}{dx_r} \frac{dx_r}{dt} + i(R_0 + R_H) = 0, \quad (8)$$

где

$$L(x_r) = L_0 - L_m \cos \frac{2\pi(x_r - x_0)}{\tau}, \quad \frac{dL}{dx_r} = \frac{2\pi L_m}{\tau} \sin \frac{2\pi(x_r - x_0)}{\tau},$$

$$\Psi_{PM}(x_r) = W\Phi_{\max} \cos \frac{\pi(x_r - x_0)}{\tau}, \quad \frac{\Psi_{PM}}{dx_r} = -\frac{W\Phi_{\max}\pi}{\tau} \sin \frac{\pi(x_r - x_0)}{\tau}. \quad (9)$$

Здесь учитывается, что индуктивность статора изменяется в зависимости от положения ротора согласно (6), а  $\Psi_{PM} = W\Phi_{PM}$ . Далее будем полагать, что ротор совершает возвратно-поступательное движение, описываемое выражением

$$x_r = A \sin(\omega_r t), \quad (10)$$

где  $A$  и  $\omega_r = 2\pi f_r$  – амплитуда и угловая частота механических колебаний ротора, соответственно.

Дифференциальное уравнение (8) совместно с выражениями (9) и (10) представляют собой математическую модель, описывающую динамические процессы в линейном генераторе возвратно-поступательного движения при работе на активную нагрузку. Для численной реализации этой модели в работе использовался пакет программ Matlab/Simulink [8].

**Форма напряжения холостого хода генератора.** При расчетах использовались следующие значения параметров генератора:  $w=700$  витков,  $R_0=1,2$  Ом,  $L_0=2,33 \cdot 10^{-6} w^2$  Гн,  $L_m=0,27 \cdot 10^{-6} w^2$  Гн,  $\Phi_{\max}=0,0033$  Вб,  $\tau=43,5$  мм. Предварительно проведенные исследования показали, что так как для исследуемого генератора величина  $L_m \ll L_0$ , то в уравнении (7) и (8) можно принять  $L(x_r) \approx L_0 = \text{const}$ . При этом величина мощности в активной нагрузке отличается от "точного" расчетного значения, полученного с учетом  $L(x_r)$ , не более, чем на 5%.

Разработанная с учетом этого упрощения Simulink-модель генератора показана на рис. 4 и включает силовые блоки, блоки измерения электрических величин – напряжения, электрического тока и средней мощности, а также виртуальные осциллографы для визуализации результатов расчета.

Результаты расчета напряжения холостого хода на обмотке генератора при различных значениях амплитуды  $A$  механических колебаний ротора и относительного положения статора  $x_0$  показаны на рис. 5. Здесь показана форма напряжений (левая часть графиков) и спектральный

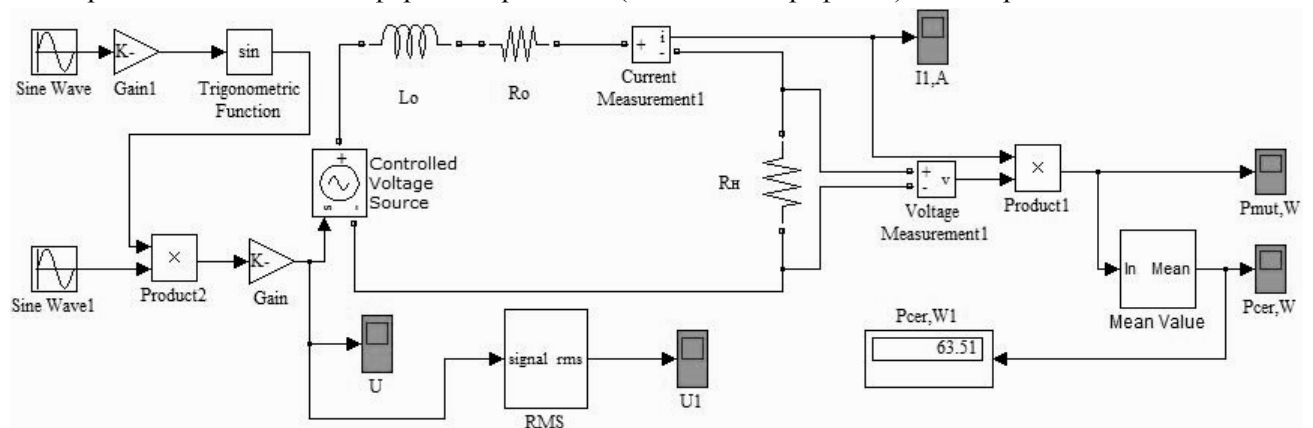


Рис. 4

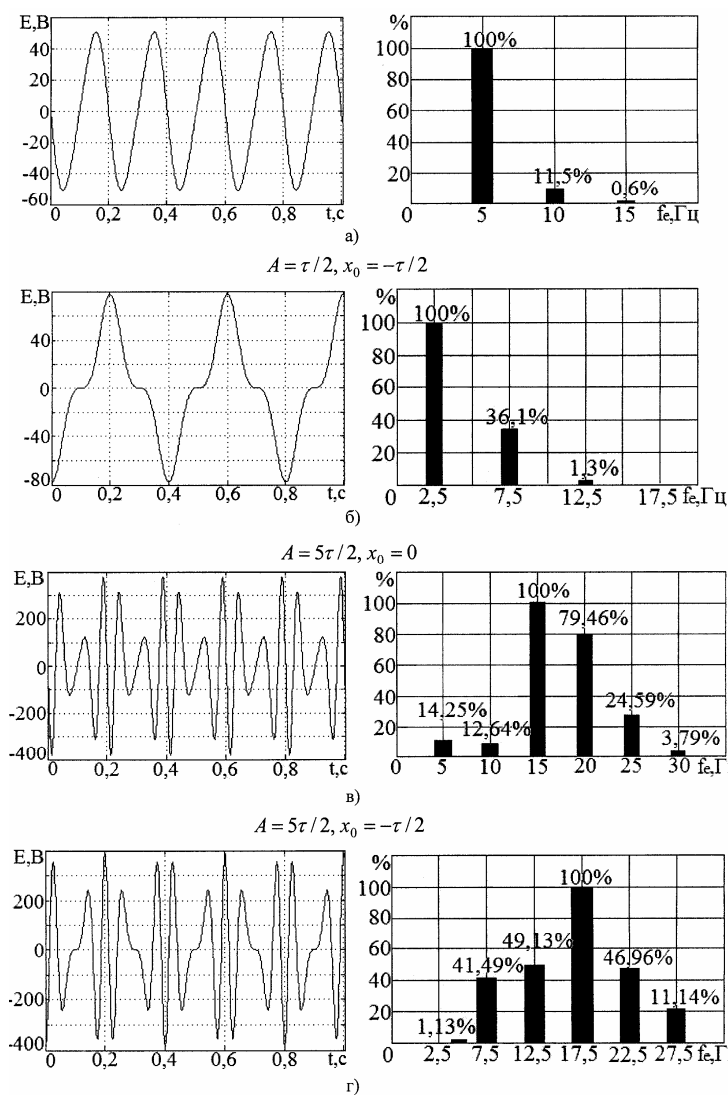


Рис. 5

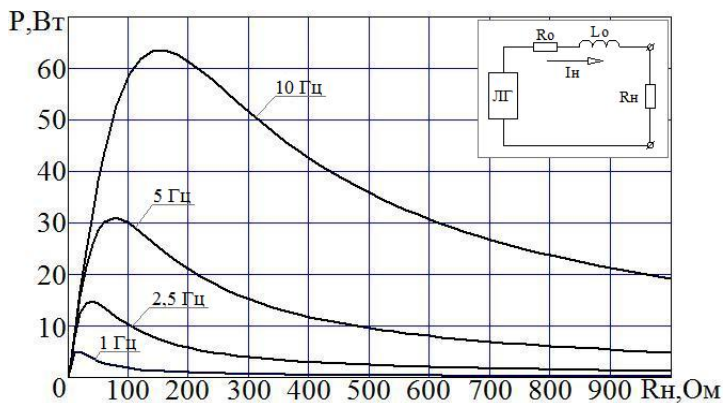
нию к механической частоте колебаний ротора).

Напряжение для случая малой амплитуды ( $A = \tau/2, x_0 = -\tau/2$ ) имеет частоту, равную механической частоте колебаний ротора  $f_e = f_r = 2,5$  Гц и характеризуется наличием значительной по амплитуде третьей гармоники (рис. 5, б). Равенство частот для этого случая обусловлено тем обстоятельством, что за время одного периода механических колебания ротора  $T_r = 1/f_r$  магнитный поток, пронизывающий обмотку статора, проходит последовательно через следующие значения:  $0 - \Phi_{\max} - 0 - \Phi_{\min} - 0$ , т.е. период изменения потока равен периоду механических колебаний ротора. Амплитудное значение напряжения в этом случае оказывается выше, чем при  $A = \tau/2, x_0 = 0$ ; эти напряжения соотносятся как 80 В и 50 В. Сравнение энергетических характеристик для этих двух случаев будет рассмотрено далее.

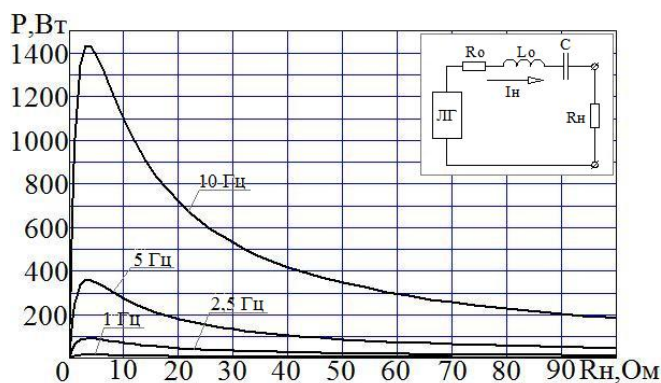
Напряжение для случая большой амплитуды колебаний ротора показано на рис. 5, в, г и иллюстрирует сложный полигармонический закон его изменения во времени. В кривых напряжения содержится большое количество гармоник, как высших так и низших по отношению к основной частоте, равной 15 Гц для случая  $x_0 = 0$  и 17,5 Гц для случая  $x_0 = -\tau/2$ . При этом амплитуда напряжения значительно превышает напряжение в случае  $A = \tau/2$ .

состав этих кривых (правая часть графиков). Рассмотрены два случая – малой амплитуды колебаний при  $A = \tau/2$  и большой амплитуды колебаний при  $A = 5\tau/2$ . Отметим, что в случае малой амплитуды колебаний было выбрано значение  $A = \tau/2$  в связи с тем, что именно при этом минимальном значении  $A$  величина потока в обмотке статора изменяется от максимально возможного значения  $\Phi_{\max}$  и до минимально возможного –  $\Phi_{\min}$ . В случае  $A < \tau/2$  перепад величины потока в обмотке уменьшается, что приводит к снижению ЭДС в обмотке генератора.

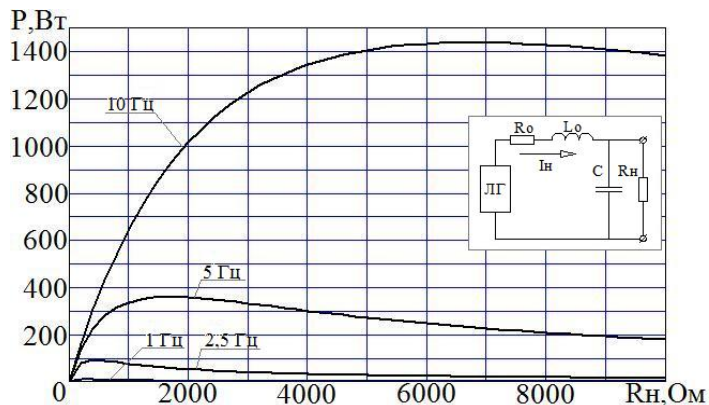
Форма напряжения для случая малой амплитуды колебаний ( $A = \tau/2, x_0 = 0$ ) близка к синусоиде (рис. 5, а). В кривой напряжения существует лишь небольшая по величине вторая гармоника, составляющая 11,5% от первой. Характерной особенностью для этого случая является то, что электрическая частота равна удвоенной механической частоте –  $f_e = 2f_r = 5$  Гц. Это вызвано тем, что за время одного периода механических колебаний ротора  $T_r = 1/f_r$  величина магнитного потока, сцепленного с обмоткой статора, проходит последовательно через следующие значения:  $\Phi_{\max} - 0 - \Phi_{\max} - 0 - \Phi_{\max}$ . То есть величина потока за это время дважды повторяет одни и те же значения, что и приводит к удвоению электрической частоты напряжения (по отноше-



а)



б)



в)

Рис. 6

отбираемой мощности максимальна. В случае последовательного включения емкости оптимальное сопротивление нагрузки приблизительно равно внутреннему сопротивлению генератора –  $R_H^* \approx R_0$  (равенство является приблизительным из-за наличия высших гармоник в кривой напряжения). Отсю-

### Мощность в активной нагрузке.

Результаты расчета с помощью разработанной Simulink-модели величины средней за период мощности, выделяемой в активной нагрузке, для случая формы напряжения согласно рис. 5, а ( $A = \tau/2, x_r = 0$ ) показаны на рис. 6. Учитывая, что реактивное сопротивление исследуемого генератора велико, для компенсации реактивной мощности в работе применялась емкость, включенная последовательно или параллельно с нагрузкой. Результаты расчета мощности в нагрузке для трех указанных случаев – при отсутствии емкости, при последовательном и при параллельном включении емкости, приведены на рис. 6. В схеме без емкости (рис. 6, а) существует оптимальное значение сопротивления нагрузки  $R_H^* \approx \sqrt{(\omega_e L_0)^2 + R_0^2}$  – см. далее выражение (13). Здесь  $\omega_e = 2 \cdot 2\pi f_r$  – электрическая угловая частота, равная для случая  $A = \tau/2, x_0 = 0$  удвоенной механической частоте. В силу большого реактивного сопротивления в цепи генератора, величина тока мала и мощность, выделяемая в оптимальной нагрузке, также мала. С ростом частоты мощность в нагрузке возрастает приблизительно пропорционально частоте колебаний ротора  $f_r$ . Такой рост мощности связан с тем, что напряжение и оптимальное сопротивление нагрузки растут приблизительно пропорционально частоте, отсюда и мощность, равная  $U^2 / R_H^*$ , также растет пропорционально этой частоте.

Результаты расчетов для случая последовательного и параллельного включения емкости показаны соответственно на рис. 6, б и в. Из графиков зависимостей мощности на рис. 6, б, в можно сделать следующее заключение.

- Применение емкости позволяет существенно повысить величину мощности, отбираемой от генератора и выделяемой в нагрузке. Причем, величина этой мощности не зависит от способа включения емкости.

- Существует оптимальное сопротивление нагрузки  $R_H^*$ , при котором величина

да схему с последовательным включением емкости можно рекомендовать при работе генератора на низкоомную нагрузку.

- Случай параллельного включения емкости характеризуется относительно большим значением оптимального сопротивления нагрузки и такую схему лучше применять при работе генератора на высокоомную нагрузку.

Так как напряжение генератора в случае  $A = \tau / 2$ ,  $x_0 = 0$  является практически синусоидальным, то для расчета величины мощности в нагрузке в этом случае, а также расчета величины оптимального сопротивления нагрузки можно использовать аналитические выражения, которые приведены далее для случая синусоидального источника напряжения. Эквивалентные электрические схемы для трех рассматриваемых случаев показаны на рис. 7.

Для схемы на рис. 7, а, когда емкость отсутствует, справедливы следующие выражения.

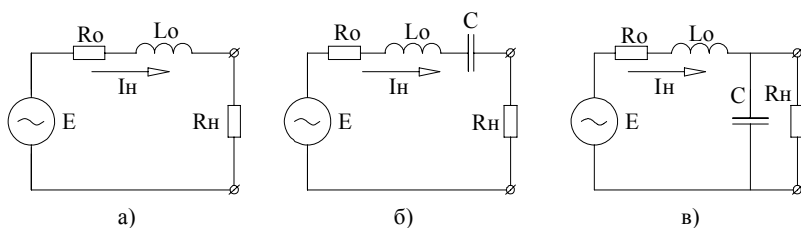


Рис. 7

Величины тока и мощности в нагрузке

$$I = E / [(R_0 + R_n)^2 + (\omega_e L_0)^2]^{-0.5}, \quad (11)$$

$$P_n = I^2 R_n = \frac{E^2 R_n}{(R_0 + R_n)^2 + (\omega_e L_0)^2}. \quad (12)$$

Оптимальное значение  $R_n^*$  получим из (12) путем дифференцирования по  $R_n$ :

$$R_n^* = \sqrt{(\omega_e L_0)^2 + R_0^2}. \quad (13)$$

Максимальное значение мощности в нагрузке в этом случае:

$$P_n^* = \frac{E^2}{4\sqrt{(\omega_e L_0)^2 + R_0^2}}. \quad (14)$$

При  $\omega L_0 \ll R_0$  величина

$$R_n^* = R_0, \quad P_n^* = E^2 / 4R_0. \quad (15)$$

Для схемы на рис. 7, б, когда емкость включена последовательно с нагрузкой, величина тока достигает максимума при выполнении условия резонанса  $\omega_e L_0 = 1 / \omega_e C$ . Отсюда величина оптимальной емкости  $C^* = 1 / (\omega_e^2 L_0)$ . При этом согласно (15) оптимальное значение  $R_n^* = R_0$ , а максимальное значение мощности в нагрузке  $P_n^* = E^2 / 4R_0$ .

Для схемы на рис. 7, в, когда емкость включена параллельно нагрузке, могут быть получены следующие соотношения.

Электрическую схему с параллельным соединением емкости преобразуем в эквивалентную схему с последовательным соединением с эквивалентными параметрами  $R_{эке}, C_{эке}$ , вычисляемыми на основании следующих выражений [1]:

$$R_{эке} = R_n / [1 + (R_n \omega_e C)^2], \quad C_{эке} = [1 + (R_n \omega_e C)^2] / R_n^2 \omega_e^2 C. \quad (16)$$

Отсюда из условия  $\omega_e L_0 = 1 / \omega_e C_{эке}$  и  $R_{эке} = R_0$  получим следующие значения для оптимальных параметров цепи

$$R_H^* = R_0 + (\omega_e L_0)^2 / R_0, \quad C^* = L_0 / [R_0^2 + (\omega_e L_0)^2]. \quad (17)$$

Расчетные значения  $R_H^*$  согласно (17) для данных рис. 6, в при частотах  $f_r = 2,5; 5$  и  $10$  Гц составляют соответственно  $R_H^* = 0,421; 1,67$  и  $6,7$  кОм. Эти значения хорошо согласуются с результатами численных расчетов на рис. 6, в.

В случае, если  $\omega_e L_0 \gg R_0$ , выражения (17) упрощаются следующим образом:

$$R_H^* \approx (\omega_e L_0)^2 / R_0 \gg R_0, \quad C^* = 1 / \omega_e^2 L_0. \quad (18)$$

При этих оптимальных значениях параметров величина мощности, выделяемой в активной нагрузке, будет достигать максимального значения, равного  $P_n^* = E^2 / 4R_0$ .

Из анализа выражений (17) и (18) видно, что при параллельном включении емкости величина оптимальной нагрузки значительно превышает собственное активное сопротивление генератора – т.е. случай параллельного включения целесообразно применять при работе на большую омическую нагрузку.

Приведенные выше результаты расчетов и аналитические выражения справедливы для напряжения генератора синусоидальной формы – этот случай реализуется при  $A = \tau / 2, x_0 = 0$  (рис. 5, а). При несинусоидальном напряжении генератора задача определения оптимального значения  $C^*$  может быть решена с помощью разработанной Simulink-модели. Результаты ее решения приведены далее.

**Сравнение двух вариантов генератора.** Выполним сравнение двух вариантов генератора, соответствующих данным рис. 5, а, и рис. 5, б по величине напряжения и мощности в нагрузке. Вариант 1 характеризуется значениями  $A = \tau / 2, x_0 = 0$ , а вариант 2 –  $A = \tau / 2, x_0 = -\pi / 2$  (рис. 5 а, б). Рассматривается случай последовательного включения оптимальной емкости для обоих вариантов. Для 1-го варианта напряжение практически синусоидальное (рис. 5, а) и в этом случае  $C^* = 1 / ((2\omega_r)^2 L_0)$ . Для 2-го варианта оптимальное значение  $C^*$  определялось с помощью разработанной Simulink-модели генератора. Полученная расчетная зависимость мощности  $P_n(C)$  показана на

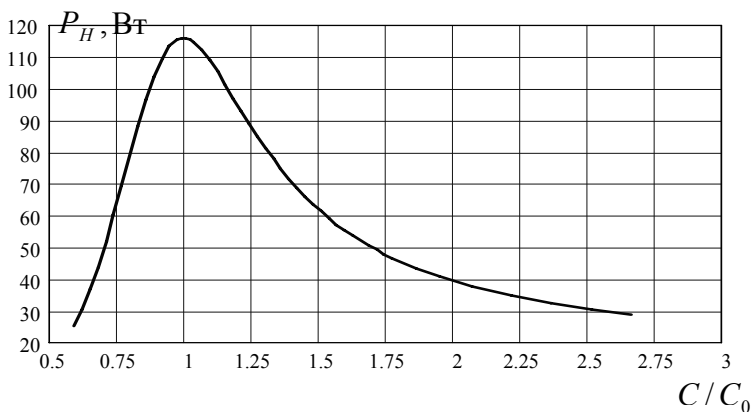


Рис. 8

рис. 8, из которой следует, что оптимальное значение емкости для варианта 2 составляет  $C^* \approx 1 / (\omega_r^2 L_0) = 3,4$  мФ.

Результаты сопоставительного анализа двух вариантов приведены в таблице. Как следует из этой таблицы, вариант 1 характеризуется меньшим количеством высших гармоник, меньшей величиной оптимальной емкости (из-за более высокой частоты), но передает в нагрузку меньшую мощность, т.е. с точки зрения передачи максимальной мощности в нагрузку более предпочтителен генератор по варианту 2.

**Заключение.** Разработана математическая модель и Simulink-программа для анализа динамических процессов и эффективности энергопреобразования в однофазном магнитоэлектрическом линейном генераторе возвратно-поступательного движения. Показано, что для получения синусоидального напряжения холостого хода генератора необходимо осуществлять колебание ротора с амплитудой, равной  $\tau / 2$ . При этом электрическая частота равна удвоенной механической частоте колебаний ротора. При других значениях амплитуды колебаний напряжение имеет сложную полигармоническую форму. Рассмотрен спектральный состав этого напряжения при различной амплитуде колебаний ротора.



Величина	Вариант 1	Вариант 2
Амплитуда напряжения холостого хода, В	50	80
Частота напряжения, Гц	5	2,5
Амплитуда первой гармоники напряжения, В	49,6	56
Коэффициент гармоник $k = (U_2^2 + U_3^2 + U_5^2 + \dots)^{0,5} / U_1$	12,1 %	37,4 %
Оптимальное значение емкости, мФ	0,84	3,4
Оптимальная величина сопротивления нагрузки $R_H^*$	$R_0 = 3,4$ Ом	$R_0 = 3,4$ Ом
Средняя мощность, выделяемая в нагрузке $R_H^*$ , Вт	90	116

- Исследуемый генератор характеризуется большим индуктивным сопротивлением, существенно ограничивающим величину мощности, передаваемой в активную нагрузку. В работе рассмотрен случай компенсации реактивной мощности с помощью конденсаторной батареи, включенной как последовательно, так и параллельно нагрузке. Показано, что при работе на низкоомную нагрузку целесообразно применять схему с последовательным включением емкости, а при работе на высокоомную нагрузку – ее параллельное включение. Для случая несинусоидального напряжения генератора рассмотрена задача выбора оптимального значения емкости с использованием разработанной Simulink-программы.
- Проведено сравнение двух вариантов исполнения генератора, отличающихся пространственным сдвигом статора по отношению к ротору и предложен вариант с наибольшей мощностью в оптимальной нагрузке.

1. Атабеков Г.И. Основы теории цепей. М.: Энергия, 1969. – 424 с.
2. Иванова И.А. Исследование и разработка магнитоэлектрического линейного генератора для преобразования энергии морских волн : Дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01 СПб., 2006. – 119 с.
3. Козирський В.В., Петренко А.В. Підвищення ефективності електроводопостачання споживачів у сільських регіонах на базі впровадження автономної комбінованої вітроустановки. // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2007. – № 1. – С. 14–22.
4. Морозкина М.В. Разработка волновых энергетических установок с линейными электрическими генераторами: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.08. М., – 1993. – 19 с.
5. Baker N. "Linear Generators for Direct Drive Marine Renewable Energy Converters". A thesis for the Degree of Doctor of Philosophy (PhD). – University of Durham. – 2003.
6. Ivanova I.A, Agren O., Bernhoff H. Simulation of Wave-Energy Converter With Octagonal Linear Generator. IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2005. – V. 30. – №.3. – 2005. – Pp. 619–629.
7. Waters R., Stalberg M., Danielsson O. et al. Experimental results from sea trials of an offshore wave energy system. Applied Physics Letters, 90. – 2007.
8. [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)

Надійшла 27.03.2009