

Выбор конструкции и математическая модель линейного электрического генератора с двигателем со свободным поршнем

Авторы:

доцент МАМИ, к.т.н.

Кецарис А.А.

аспирант МАМИ

Духанин В.И.

Аннотация: В настоящей работе рассматривается применение линейной синхронной электрической машины, интегрированной с двигателем внутреннего сгорания со свободным поршнем, в качестве генератора в силовых установках гибридных транспортных средств. Рассматриваются виды и схемы применения интегрированного линейного генератора. Приводится упрощенная математическая модель интегрированной силовой установки на основе уравнения колебания подвижного элемента, а также выбор типа и параметров конструкции линейной электрической машины.

1. Выбор конструкции и основных параметров линейного генератора

Линейный генератор является электромеханическим устройством, имеющим движущийся возвратно-поступательно подвижный элемент. Для оценки возникающих при этом знакопеременных инерционных механических нагрузках было проанализировано движение поршней в отечественных двигателях внутреннего сгорания ВАЗ, ГАЗ, КАМАЗ (приведенные в таблице 1).

Таблица 1

Наименование параметра	Единица измерения	Величина
Мощность на один цилиндр	кВт	11,4 – 32,5
Частота колебаний поршня	Гц	34 – 94
Средняя сила	кН	5,18 – 12,5
Максимальная скорость	м/с	27,7 – 47
Максимальное ускорение	G (9,81 м/с ²)	652 – 2609

На подвижный элемент электрической машины действуют знакопеременные перегрузки от 650g (низкооборотные дизельные двигатели) до 2600 (форсированные высокооборотные двигатели). Это особенно важно, поскольку на подвижном элементе закрепляются постоянные магниты, подверженные падению намагниченности при воздействии ударных нагрузок, а также вследствие хрупкости материала магнита возможно их раскалывание.

Кинетическая энергия подвижного элемента преобразуется в электрическую энергию посредством силового электромагнитного взаимодействия магнитных полей статора и подвижного элемента. При этом на подвижный элемент будут воздействовать суммарная сила от 5 000 до 12 000 Н (500-1200 кГс). В случае наличия на подвижном элементе постоянных магнитов силы магнитного взаимодействия будут прикладываться в основном локально к ним, вызывая местное нагружение хрупкого материала постоянных магнитов. Требуется также обратить внимание на крепление постоянных магнитов на несущем корпусе подвижного элемента.

Из таблицы также можно оценить и требуемый уровень преобразуемой в электрическую энергию мощности – 11 ... 32 кВт.

Классификация линейных электрических машин по типу конструкции подвижного элемента приведена на рис.5 [1].

Конструкция с подвижным элементом с закрепленными на нем катушками, движущимися в магнитном поле постоянных магнитов, закрепленных на статоре (рис.1,а), имеет существенный недостаток – необходимость щеточного узла для снятия

индуцируемых токов с подвижных катушек и передачи их нагрузке. Использование щеточный узел линейного действия требует постоянного обслуживания, замены износившихся элементов, является узлом с низкой надежностью.

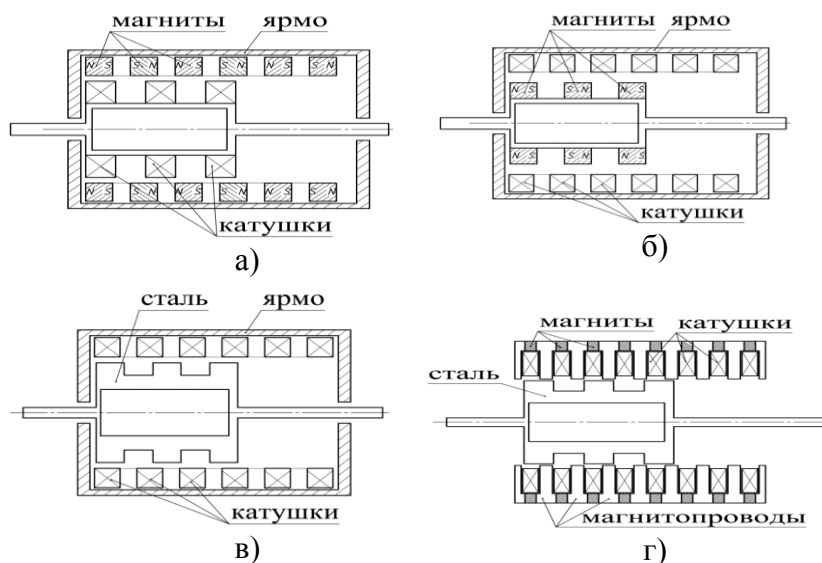


Рис.1 Классификация линейных электрических машин по типу подвижного элемента:

- а) подвижные катушки;
- б) подвижные магниты;
- в) подвижный стальной сердечник с электромагнитным возбуждением;
- г) подвижный стальной сердечник с возбуждением от постоянных магнитов.

Вариант с кольцевыми магнитами, закрепленными на подвижном элементе (рис.1,б), наиболее популярен сейчас в конструкциях прототипов линейных электрических генераторов. Однако, как уже отмечалось, требуется решения конструктивных проблем установки магнитов, технологии их изготовления, ремонтпригодности конструкции и долговечности магнитных свойств.

В электрической машине на рис.1,в в качестве подвижного элемента используется стальной сердечник, а электрический ток индуцируется в статорных катушках, возбуждаемых отдельными обмотками возбуждения от стороннего источника тока. Эта машина

относится к коммутаторным машинам (машинам с переключением магнитного потока) и имеет преимущество в виде простоты, механической жесткости подвижного элемента. Недостатком является необходимость иметь систему внешнего возбуждения.

Этого недостатка лишена электрическая машина с возбуждением от постоянных магнитов, размещенных на статоре (рис.1,г). К простоте конструкции сердечника, как у машины на рис.1,в, добавляется исключение внешнего возбуждения, а также выгодное расположение постоянных магнитов, не подвергающихся динамическим нагрузкам, близким к ударным, возможность их охлаждения и ремонтпригодность.

В настоящее время авторами работ ведется работа по исследованию этой конструкции.

2. Математическая модель интегрального линейного электрического генератора с двигателем со свободным поршнем

Для анализа влияния конструктивных и газодинамических параметров рассмотрим динамику возвратно-поступательного движения подвижного элемента, включающего поршни, шток и подвижную часть электрической машины, принимая следующие допущения:

1. Процессы впуска, выпуска рабочего тела и процессы сгорания происходят мгновенно при постоянном объеме;
2. Расширение и сжатие рабочего тела являются адиабатическими процессами;
3. Рабочий процесс описывается PV-диаграммой идеального цикла Отто.
4. Электрическая машина работает как однофазная машина.

5. В электрической машине не учитывается влияние межзубцового сцепления, эффект «магнитной пружины» и другие эффекты неравномерности распределения магнитного поля.

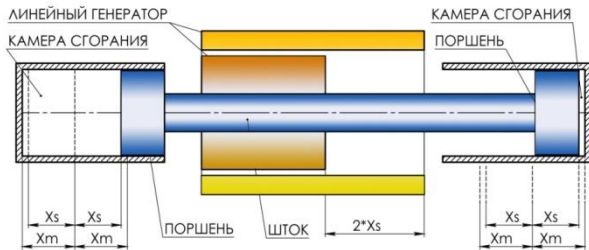


Рис.3 Расчетная схема ЛГСП

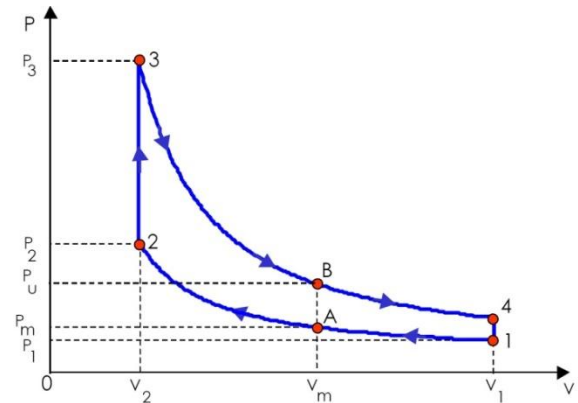


Рис.4 P-V-диаграмма идеального цикла Отто с постоянным объемом при вводе и выбросе рабочего тела.

Основное уравнение динамики линейного возвратно-поступательного движения подвижного элемента записывается в виде уравнения баланса сил [2]:

$$P_L(x)S_B - P_R(x)S_B - F_E(x) - F_f(x) = m\ddot{x} \quad (1)$$

где $P_L(x)$ – мгновенное давление в левом цилиндре;
 $P_R(x)$ – мгновенное давление в правом цилиндре;
 $F_E(x)$ – электромагнитные силы;
 $F_f(x)$ – неэлектромагнитные силы трения;
 S_B – площадь поршня;
 m – масса подвижного элемента;
 \ddot{x} – положение подвижного элемента.

Примем, что подвижный элемент движется слева направо в положительном направлении. Таким образом, в правом цилиндре будет происходить такт сжатия, в то время как в левом цилиндре будет происходить такт расширения.

Если в средней точке с координатой $x = 0$ давление в цилиндре сжатия, P_m , известно, тогда, используя предположение об адиабатическом сжатии, давление в правом цилиндре можно записать как

$$P_R V_R^n = P_m V_m^n \\ P_R = P_m \left(\frac{V_m}{V_r} \right)^n \quad (2)$$

где V_m - объем цилиндра в средней точке;
 V_r - объем правого цилиндра;
 P_R - давление в правом цилиндре;
 n – показатель адиабаты.

Объем в средней точке, V_m , может быть выражен как

$$V_m = S_B x_m = \left(\frac{\pi b^2}{4} \right) x_m \quad (3)$$

где b – диаметр цилиндра.

Аналогично, правый объем цилиндра, V_R , может быть записан как

$$V_R = V_m - \left(\frac{\pi b^2}{4} \right) x \\ V_R = \left(\frac{\pi b^2}{4} \right) (x_m - x) \quad (4)$$

Подставляя уравнения (3) и (4) в уравнение (2) получаем выражение для давления в правом (сжатие) цилиндре:

$$P_R = P_m \left(\frac{x_m}{x_m - x} \right)^n \quad (5)$$

На этот момент в исследовании давление в средней точке в левом (расширение) цилиндре, P_u , неизвестно, однако, оно может быть использовано, чтобы определить давление в цилиндре с расширением, поскольку это давление будет определено позже. Посредством аналогичного анализа, давление в левом цилиндре будет получено как:

$$P_L = P_u \left(\frac{V_m}{V_l} \right)^n = P_u \left(\frac{x_m}{x_m + x} \right)^n \quad (6)$$

Итак, уравнение баланса сил может быть переписано посредством подстановки уравнений (5) и (6) в (2), чтобы получить:

$$\left(P_u \left(\frac{x_m}{x_m + x} \right)^n - P_m \left(\frac{x_m}{x_m - x} \right)^n \right) \left(\frac{\pi b^2}{4} \right) - F_E(x) - F_f(x) = m\ddot{x} \quad (7)$$

Теперь, положим, что половина рабочего хода двигателя в установившемся режиме равна x_s . Тогда минимальный объем может быть получен в виде:

$$V_{min} = V_2 = \left(\frac{\pi b^2}{4} \right) (x_m - x_s) \quad (8)$$

Аналогично, максимальный объем получается как

$$V_{max} = V_1 = \left(\frac{\pi b^2}{4} \right) (x_m + x_s) \quad (9)$$

Затем определяется степень сжатия, как отношение максимального объема к минимальному объему и может быть выражена, используя (8) и (9), в следующем виде:

$$r = \frac{x_m + x_s}{x_m - x_s} \quad (10)$$

Теперь, ранее неизвестное давление в средней точке цилиндра с расширением, P_u , может быть найдена посредством анализа последующего цикла Отто от средней точки во время сжатия, точку А на рис.4, через выброс тепла к средней точке цилиндра с расширением. Процесс нахождения P_u начинается в точке А рис.4 и следует циклу PV к средней точке расширения, точке В, в то же время вычисляя давление, объем и температуру, что необходимо на каждой отмеченной точке. От известной точки А, давление в точке 2 находится, полагая сжатие адиабатическим от точки А до точки 2. Итак, P_2 может быть найдено в виде:

$$\begin{aligned} P_m V_m^n &= P_2 V_2^n \\ P_2 &= P_m \left(\frac{V_m}{V_2} \right)^n \end{aligned} \quad (11)$$

Подставляя уравнения (3) и (8) в (11) получаем P_2 в виде:

$$P_2 = P_m \left(\frac{x_m}{x_m - x_s} \right)^n \quad (12)$$

Используя закон идеального газа, температура в точке 2 получается как:

$$\begin{aligned} \frac{P_m V_m}{T_m} &= \frac{P_2 V_2}{T_2} \\ T_2 &= \frac{P_2 V_2 T_m}{P_m V_m} = \frac{P_2 V_2}{P_m V_m} T_m \end{aligned} \quad (13)$$

Подставляя уравнения (3), (8), и (12) в (13) получаем T_2 :

$$T_2 = T_m \left(\frac{x_m}{x_m - x_s} \right)^{n-1} \quad (14)$$

Для адиабатического сгорания при постоянном объеме, количество переданного тепла может быть выражено в виде:

$$Q_{in} = mc_v (T_3 - T_2) \quad (15)$$

Выражение (15) может быть применено для получения температуры в точке 3 из известной температуры в точке 2:

$$T_3 = T_m + \frac{Q_{in}}{mc_v} \quad (16)$$

Подставляя уравнение (14) в (16), получаем

$$T_3 = T_m \left(\frac{x_m}{x_m - x_s} \right)^{n-1} + \frac{Q_{in}}{mc_v} \quad (17)$$

Тогда давление в точке 3 может быть определено, используя закон идеального газа:

$$\frac{P_2 V_2}{T_2} = \frac{P_3 V_3}{T_3}$$

$$P_3 = \frac{P_2 V_2 T_3}{V_3 T_2} \quad (18)$$

Поскольку сгорание происходит при постоянном объеме, $V_3 = V_2$, уравнение (18) приводится к виду:

$$P_3 = P_2 \frac{T_3}{T_2} \quad (19)$$

Подставляя уравнения (12), (14) и (17) в уравнение (19), получаем:

$$P_3 = P_m \left(\frac{x_m}{x_m - x_s} \right) \left[\frac{T_m \left(\frac{x_m}{x_m - x_s} \right)^{n-1} + \frac{Q_{in}}{mc_v}}{T_m \left(\frac{x_m}{x_m - x_s} \right)^{n-1}} \right] \quad (20)$$

Из известных давления и температуры в точке 3, давление P_u , может быть найдено, предполагая, что расширение газа от точки 2 до точки В является адиабатическим:

$$P_u V_u^n = P_3 V_3^n$$

Или,

$$P_u = P_3 \left(\frac{V_3}{V_u} \right)^n \quad (21)$$

Поскольку $V_u = V_m$ и $V_3 = V_2$, уравнения (3) и (8) вместе с уравнением (20) могут быть подставлены в уравнение (21), чтобы получить:

$$P_3 = \left\{ \left(\frac{x_m}{x_m - x_s} \right)^n P_m \left[\frac{T_m \left(\frac{x_m}{x_m - x_s} \right)^{n-1} + \frac{Q_{in}}{mc_v}}{T_m \left(\frac{x_m}{x_m - x_s} \right)^{n-1}} \right] \right\} \left(\frac{x_m}{x_m - x_s} \right)^{-n} \quad (22)$$

Упрощая, получаем:

$$P_3 = P_m \left[1 + \frac{Q_{in} \left(\frac{x_m}{x_m - x_s} \right)^{1-n}}{mc_v T_m} \right] \quad (23)$$

Теперь, все величины уравнения (23) известны, за исключением T_m , которая может быть найдена следующим образом: коэффициент адиабаты задается как

$$n = \frac{C_p}{C_v} \quad (24)$$

а газовая постоянная может быть записана как

$$R_g = C_p - C_v \quad (25)$$

Комбинируя уравнения (24) и (25) R_g можно записать как:

$$R_g = (n - 1)C_v \quad (26)$$

Закон идеального газа можно записать:

$$PV = mRT \quad (27)$$

Подставляя уравнения (26) в (27) получаем закон идеального газа в следующем виде:

$$PV = m(n - 1)C_v T \quad (28)$$

Итак, в средней точке сжатия

$$P_m V_m = m(n - 1)C_v T_m \quad (29)$$

Комбинируя члены, получаем:

$$mC_v T_m P_m = \frac{P_m V_m}{(n-1)} \quad (30)$$

Подстановка уравнений (3) и (30) в (23) дает давление в средней точке расширения:

$$P_u = P_m + \frac{Q_{in} \left(\frac{x_m}{x_m - x_s} \right)^{1-n} (n-1)}{S_B x_m} \quad (31)$$

Теперь баланс сил, данный в уравнении (7), может быть записан в виде:

$$\left(\left\{ P_m + \frac{Q_{in} \left(\frac{x_s}{x_m - x_s} \right)^{1-n} (n-1)}{S_B x_m} \right\} \left(\frac{x_m}{x_m + x} \right)^n - P_m \left(\frac{x_m}{x_m - x} \right)^n \right) S_B - F_E(x) - F_f(x) = m\ddot{x} \quad (32)$$

Упростим полученное уравнение баланса сил, которое может быть использовано для симуляции устойчивого режима работы линейного двигателя, и получаем:

$$S_B P_m \left[\left(1 + \frac{x}{x_m} \right)^{-n} - \left(1 - \frac{x}{x_m} \right)^{-n} \right] + \frac{Q_{in}(n-1)}{x_m - x_s} - F_E(x) - F_f(x) = m\ddot{x} \quad (33)$$

Уравнение (33) содержит давление в средней точке цилиндра сжатия, P_m , которое не может быть непосредственно известно для заданного двигателя. Тем не менее, давление входа в точке 1 обычно известно. Итак, давление в средней точке, P_m , может быть легко найдено, полагая процесс сжатия адиабатическим от точки 1 до точки 2, которое дает давление, P_m , в виде:

$$P_m = P \left(\frac{V_1}{V_m} \right)^n \quad (34)$$

Подставляя уравнения (3) и (9) в (34), получаем P_m в виде:

$$P_m = P_1 \left(\frac{x_m + x_s}{x_m} \right)^n \quad (35)$$

Перестраивая выражение для степени сжатия, r , в уравнении (10), получаем:

$$x_s = x_m \frac{r-1}{r+1} \quad (36)$$

Подставляя уравнение (36) в уравнение (35) получаем:

$$P_m = P_1 \left(\frac{2r}{r+1} \right)^n \quad (37)$$

Тогда уравнение баланса сил может быть переписано относительно входного давления и степени сжатия:

$$S_B P_1 \left(\frac{2r}{r+1} \right)^n \left[\left(1 + \frac{x}{x_m} \right)^{-n} - \left(1 - \frac{x}{x_m} \right)^{-n} \right] + \frac{Q_{in}(n-1)}{x_m - x_s} - F_E(x) - F_f(x) = m\ddot{x} \quad (38)$$

Теперь рассмотрим выражение для электромагнитной силы $F_E(x)$ в общем виде задаваемое в [3]:

$$F_E(x) = k_{MW} \frac{2\mu_0 l F_M^2 i w}{\pi k_\mu a F_M} \quad (39)$$

где F_M – магнитодвижущая сила постоянных магнитов;

μ_0 – проницаемость вакуума, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м;

a – условная длина магнита;

l – длина периметра магнитного зазора в плоскости, перпендикулярной

линии движения, в случае цилиндрического магнита $l = \pi D_m$;

k_{MW} – коэффициент движущей силы;

k_μ – коэффициент насыщения магнитной цепи, показывающий во сколько раз возрастает сопротивление магнитной цепи по сравнению с магнитным сопротивлением воздушного зазора при учете сопротивления стальных участков магнитопровода.

Преобразуем формулу (39) к виду:

$$F_E(x) = C_{MW} i \quad (40)$$

где коэффициент C_{MW} определяется конструктивными параметрами магнитной системы электрической машины и равен

$$C_{MW} = k_{MW} \frac{2\mu_0 l F_M^2 w}{\pi k_\mu a F_M} \quad (41)$$

Уравнение (38) должно быть дополнено уравнением для тока обмотки i . В общем виде это уравнение имеет вид:

$$\frac{d\Psi_a}{dt} + iR = U_m \sin \omega t \quad (40)$$

где Ψ_a – потокосцепление рабочей обмотки двигателя;

R – активное сопротивление этой обмотки;

U_m – амплитуда подводимого напряжения (в случае двигательного режима);
 ω – круговая частота питающего напряжения.

Представляя потокосцепление Ψ_a в виде:

$$\Psi_a = L_a i + L_{1a} F_M + L_{2a} F_M \quad (41)$$

и производя дифференцирование по времени с допущениями согласно [2], получаем:

$$\frac{d\Psi_a}{dt} = L_a \frac{di}{dt} + C_{MW} \frac{dx}{dt}$$

Таким образом, уравнение (40) преобразуется к виду:

$$L_a \frac{di}{dt} + C_{MW} \frac{dx}{dt} + iR = U_m \sin \omega t \quad (42)$$

Подставляя в уравнение (38) выражение (40) для электромагнитной силы F_E и присоединяя уравнение (42), получаем систему двух уравнений (43), определяющих динамику движения подвижного элемента:

$$\begin{cases} S_B P_1 \left(\frac{2r}{r+1}\right)^n \left[\left(1 + \frac{x}{x_m}\right)^{-n} - \left(1 - \frac{x}{x_m}\right)^{-n} \right] + \frac{Q_{in(n-1)}}{x_m - x_s} - C_{MW} i - F_f(x) = m\ddot{x} \\ L_a \frac{di}{dt} + C_{MW} \frac{dx}{dt} + iR = U_m \sin \omega t \end{cases} \quad (43)$$

Из системы уравнений (43) можно сделать выводы:

1. Оба этих уравнения описывают два сопряженных параметрических колебательных процесса:
 - колебание массы на активной газодинамической пружине (подводимая энергия сгорания);
 - электрические колебания в цепи электрической машины.
2. Вследствие нелинейности адиабатического теплового процесса и, строго говоря, электрических процессов в магнитных цепях, уравнения нелинейные.
3. Для оптимальной работы системы необходимо искать решения в области совпадения собственных частот механических и электрических колебаний.

4. Заключение

В настоящей работе рассмотрено применение линейных генератора с двигателем внутреннего сгорания со свободным поршнем, как интегрированной силовой установки в гибридных автомобилях.

Дан краткий обзор теоретических исследований и существующих разработок линейных генераторов с двигателем со свободным поршнем (ЛГСП). Рассматриваются виды электрических линейных машин и требования к ним для применения в ЛГСП.

В приведенной упрощенной сопряженной математической динамической модели двигателя внутреннего сгорания со свободным поршнем и линейной электрической машины показано, что для оптимальной работы системы необходимо искать решения в области совпадения собственных частот механических и электрических колебаний.

Список литературы

1. Hanson Jorgen, Analysis and Control of a Hybrid Vehicle Powered by a Free-Piston Energy Converter, Electrical Machines and Power Electronics School of Electrical Engineering. Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden 2006
2. Cawthorne William R., Optimization of a Brushless Permanent Magnet Linear Alternator for Use With a Linear Internal Combustion Engine. Dissertation, the College of Engineering and Mineral Resources at West Virginia University, Morgantown, West Virginia, 1999
3. Хитереп М.Я., Овчинников И.Е. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения. СПб, КОРОНА принт, 2008