

УДК 621.313.322

**ОБОБЩЁННАЯ МЕТОДИКА МИНИМИЗАЦИИ МАССЫ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО АККУМУЛЯТОРА (ЭМА)**

А.Подгорнов, докт.техн.наук, **А.Сипович**, канд.техн.наук,
**Рижский Технический Университет,
Бульвар Кронвалда, 1, Рига, LV-1010, Латвия.**

Рассмотрена методика нахождения минимума массы электромеханического аккумулятора, в состав которого входит электромеханический преобразователь и стальной маховик. Используя классические формулы проектирования синхронных электрических машин с электромагнитным возбуждением и формулы расчёта прочности маховика, получена функция массы ЭМА, который работает в разрядном режиме. Для нахождения минимума массы разработана расчётная программа на языке TURBO BASCAL. В качестве численного примера приводится расчёт минимума массы аккумулятора для сети электрифицированного транспорта, являющейся перспективной областью применения ЭМА. Библ. 5.

Ключевые слова: синхронный генератор, минимизация массы, электромеханический аккумулятор электрифицированный транспорт.

Известно много различных способов накопления энергии: аккумуляторные батареи, потенциальная энергия воды в гидроаккумулирующих электростанциях, конденсаторы, магнитное поле катушки, кинетическая энергия. Существуют электромеханические аккумуляторы (ЭМА), использующие кинетическую энергию вращающихся масс в маховиках. Электрическая машина в ЭМА служит преобразователем для подвода и снятия энергии из маховика. Энергия, накопленная в маховике, вычисляется по формуле

$$W_{kin} = J \omega^2 / 2, \quad (1)$$

где W_{kin} – энергия (Дж), J – момент инерции маховика ($\text{кг}\cdot\text{м}^2$), ω – угловая скорость вращения (рад/с). Данная формула справедлива для маховика любой формы. Масса ЭМА определяется уравнением

$$m_{EMA} = m_{gen} + m_{sp}, \quad (2)$$

где m_{EMA} – масса ЭМА (кг), m_{gen} – масса электрической машины (кг), m_{sp} – масса маховика (кг). Масса электрической машины включает в себя материал магнитопровода статора и ротора, а также обмоточный материал, при этом масса герметизирующего кожуха не рассматривается, так как всегда пропорциональна размерам машины и маховика. Для определения массы маховика используем выражение [3]

$$m_{sp} = 4W_k \left[\eta_{izl} (R_{sp} \omega_1)^2 (1 - \omega_{2*}^2) \right]^{-1}, \quad (3)$$

где W_k – количество накопленной энергии (Дж), η_{izl} – коэффициент полезного действия ЭМА в разрядном цикле, R_{sp} – радиус маховика (м), ω_1 – максимальная (в начале разрядного цикла) угловая скорость вращения (рад/с), ω_{2*} – относительная минимальная (в конце разрядного цикла) угловая скорость вращения ($\omega_{2*} = \omega_2 / \omega_1 = (\omega_1 - \Delta\omega) / \omega_1$ и ω_2 – ее абсолютное значение, $\Delta\omega$ – изменение угловой скорости вращения в разрядном цикле (рад/с).

В качестве электрической машины в ЭМА рассмотрим синхронную машину с электромагнитным возбуждением, работающую в генераторном режиме; изменение скорости вращения компенсируется форсированием тока возбуждения. Зная P_{izl} – разрядную мощность, находим значение главных размеров машины из уравнения машинной постоянной Арнольда

$$D_1^2 l_\delta = 2 P_{izl} k_E (k_f \omega_1 \omega_{2*} k_{in} \alpha_\delta B_\delta A_1 \pi \cos \varphi)^{-1}, \quad (4)$$

где k_E – коэффициент ЭДС, отношение E_δ к номинальному напряжению электрической машины в генераторном режиме, A_1 – токовая нагрузка (А/м), α_δ – расчётное отношение среднего значения индукции в воздушном зазоре к её максимальному значению, k_f – коэффициент формы кривой поля, являющийся отношением действующего значения ЭДС к среднему, k_{in} – коэффициент обмотки статора основной гармонической кривой ЭДС, l_δ – расчётная длина сердечника статора (м), B_δ – максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре (Т), D_1 – диаметр рачотки статора (м).

После преобразований получим уравнение массы машины

$$m_{gen} = \frac{k_D^2 \gamma_{ter} k_E}{2 k_f k_{in} \alpha_\delta B_\delta A_1 \cos \varphi} \cdot \frac{P_{izl}}{\omega_1 \omega_{2*}} = k_{gen} \frac{P_{izl}}{\omega_1 \omega_{2*}}, \quad (5)$$

где k_{gen} – коэффициент генератора, введённый для упрощения уравнения массы и учитывающий все внутренние параметры машины. После преобразований выражение массы ЭМА

$$m_{EMA} = \frac{4W_k}{\eta_{izl} R_{sp}^2 \omega_1^2 (1 - \omega_{2*}^2)} + k_{gen} \frac{P_{izl}}{\omega_1 \omega_{2*}} \quad (6)$$

Из уравнения (6) видно, что при заданных разрядной мощности, энергии, параметрах маховика и электрической машины единственным неопределённым элементом остаётся ω_{2*} . Для нахождения минимума массы используем метод бисекции. Алгоритм нахождения минимума функции существенно упрощается и

является универсальным, т.к. не зависит от характера функции [5]. Расчётная программа создана на языке TURBO PASCAL.

В качестве иллюстрации проведём численный расчёт минимума массы ЭМА для трамвая. Необходимая разрядная мощность определяется как $P_{izl} = W_k / t_{izl}$, где P_{izl} – средняя мощность (Вт) в течении t_{izl} – времени разрядного цикла (с). Необходимое количество энергии для разгона трамвая до нужной скорости находится по упрощённой методике – кинетическая энергия равномерно движущегося тела, с учётом энергии вращающихся деталей через коэффициент 1,15 [1]. Параметры, принятые для расчёта энергии и мощности, $m_{tr} = 42000$ кг (Шкода 15Т) [1], $v_1 = 10$ м/с, $t_{izl} = 5$ с.

Внутренние параметры электрической машины и маховика, без учёта типа и конструкции обмоток статора и ротора [2]: $\eta_{izl} = 0,9$, $R_{sp} = 0,558$ м (по результату прочностного расчёта), $\omega_1 = 314$ рад/с, $P_{izl} = 462000$ Вт, $k_D = 1,5$, $\gamma_{ter} = 7800$ кг/м³, $k_E = 1$, $k_F = 1,14$, $k_{tin} = 0,9$, $\alpha_\delta = 0,65$, $B_\delta = 0,85$ Т, $A_1 = 75000$ А/м [4], $\cos\varphi = 1$. По результату расчёта получен оптимальный вариант $\omega_{2*_{opt}} = 0,622$, $m_{EMA} = 1143$ кг, $m_{gen} = 492$ кг, $m_{sp} = 651$ кг.

1. Байрыева Л.С., Шевченко В.В. Электрическая тяга, городской наземный транспорт. – М.: Транспорт, 1986. – 203 с.
2. Ледовский А.Н., Литвинов И.И., Новиков М.Э., Тимофеев А.Т. Проблемы создания кинетических аккумуляторов электрической энергии // Электричество. – 1978. – №3. – С.41–45.
3. Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизюрин С.Р., Васюкевич П.В. Накопители энергии. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.
4. Гольдберг О.Д., Гуринов Я.С., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 1984. – 431 с.
5. Zvedris A. Elektromagnētisko ierīču magnētisko sistēmu optimizācija. – R.:RTU, 2004.

УДК 621.313.322

Узагальнена методика мінімізації маси електромеханічного акумулятора (ЕМА)

А.Подгорнов, докт.техн.наук, А.Сипович, канд.техн.наук,

Ризький Технічний Університет,

Бульвар Кронвалда, 1, Рига, LV-1010, Латвія.

Розглянуто методику знаходження мінімуму маси електромеханічного акумулятора, до якого входить електромеханічний перетворювач і сталевий маховик. З використанням класичних формул проектування синхронних електричних машин з електромагнітним збудженням та формул розрахунку міцності маховика отримано функцію маси ЕМА, що працює у розрядному режимі. Розроблено розрахункову програму мовою програмування TURBO BASCAL для визначення мінімуму маси. Наведено приклад розрахунку мінімуму маси акумулятора для мережі електрофікованого транспорту, котра є перспективною областю застосування ЕМА. Бібл. 5.

Generalized method of the electromechanical battery (EMB) mass minimization

A.Podgornov, A.Sypovyc

Riga Technical University, Kronvalda street 1, Riga, LV-1010, Latvia

In this paper electromechanical battery mass minimization method is described; battery includes an electromechanical transducer and a steel flywheel. Using the synchronous electrical machines with electromagnetic excitation design equations and the flywheel strength equation, EMA mass functions is created for application which works in generator mode. For battery mass function minimization a special computer program was written in TURBO PASCAL language. As a numerical example of the minimum mass calculation, battery for electric transport network is presented.

References 5.

Keywords: synchronous generator, mass minimization, electromechanical battery.

1. Bairyeva L.S., Shevchenko V.V. Electrical drives, land electrical transport. – Moskva: Transport, 1986. – 203 p. (Rus.)
2. Ledovskii A.N., Litvinov I.I., Novikov M.E., Timofeev A.T. The problems of design of kinetic energy storage applications // Elektrichestvo. – 1978. – №3. – Pp. 41–45. (Rus.)
3. But D.A., Alievskii B.L., Miziurin S.R., Vasiukevich P.V. Energy battery. – M.: Energoatomizdat, 1991. – 400 p. (Rus.)
4. Goldberg O.D., Gurin Ja.S., Sviridenko I.S. Electrical machine design. – M.: Visshaia, Shkola., 1984. – 431 p. (Rus.)
5. Zvedris.A. Electromagnetic application magnetic circuit optimization. – Riga: RTU, 2004. (Lv.)

Надійшла 26.01.2012

Received 26.01.2012