

звернути увагу на факт сумісної роботи декількох СКЗ з різними схемотехнічними рішеннями керування випрямлячів, то сповільнення корозійних процесів можливе тільки на основі сумісного керування станціями катодного захисту за певним законом керування на основі встановлення взаємозв'язку між параметрами електротехнічної системи «станція катодного захисту – підземний сталевий трубопровід – ґрунт» та режимами роботи станцій катодного захисту.

**Висновки.** Використання постійних значень струму та напруги у розрахунках та експлуатації системи протикорозійного захисту без врахування того, що:

- сигнал виходу СКЗ та потенціал захисту є полігармонійними сигналами;
- реактивна складова опору під впливом полігармонійних струмів, що протікають трубопроводом є змінною;

призводить до некоректної оцінки протикорозійного стану, спотворення розподілення потенціалу захисту вздовж трубопроводу, що зумовлює надмірне використання електричної енергії та нераціональні витрати матеріалів анодного заземлювача.

Покращення корозійної ситуації можливо забезпечити шляхом мінімізації коливань значень потенціалу за довжиною трубопроводу й, одночасно, за часом в наслідок встановлення залежностей між електротехнічними параметрами системи «станції катодного захисту – підземний металевий трубопровід – ґрунт» і її режимами роботи.

### Список використаних джерел

1. Стрижевский И. В. Теория и расчет влияния электрифицированной железной дороги на подземные металлические сооружения. / И.В. Стрижевский, В.И. Дмитриев. – М.: Машиностроение, 1967 – 227с.
2. Азюковський О.О. Потенціал підземного металевого трубопроводу сформований електротехнічною системою електрохімічного захисту. / О.О.Азюковський // Гірничі електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб. – 2014. – Вип. 92. – С. 18-22.
3. Азюковський О.О. Формування високочастотним інверторним випрямлячем захисного потенціалу підземного сталевого трубопроводу. / О.О.Азюковський // Гірничі електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб. – 2013. – Вип. 91. – С. 37-41.
4. Aziukovskyi A. The electrochemical cathodic protection stations of underground metal pipelines in uncoordinated operation mode / A. Aziukovskyi // CRC Press. Balkema is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business, London, UK 2013– P. 47 – 55.
5. Азюковський О.О. Зміна електротехнічних параметрів підземного металевого трубопроводу під впливом високочастотної складової напруги станцій катодного захисту. / О.О. Азюковський // Електрифікація транспорту. Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. № 10, 2015. с. 98-106
6. Азюковський О. О. Визначення струму стікання з підземного трубопроводу з врахуванням основних джерел збурень для підземних металевих комунікацій / О.О. Азюковський // Гірничі електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб. – 2018. – Вип. 100. – С. 19 - 24.

*Рекомендовано до друку: к-том техн. наук, проф. Казачковським М.М.*

УДК 621.311.25: 621.311.29

*С. В. Плаксин, д-р физ.-мат. наук, Н. Е. Житник, Р. Ю. Левченко, С. Я. Остаповская  
(Украина, Днепр, Институт транспортных систем и технологий НАН Украины)*

### НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИВОДА СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ ФОТОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

**Анотація** Запропоновано комбінований накопичувач енергії для гарантованого безперебійного електропостачання електроприводу системи орієнтації сонячних батарей фотоелектростанцій, що враховує особливості функціонування електроприводу в умовах нештатної експлуатації. Накопичувач являє собою комбінацію трьох видів взаємопов'язаних і функціонально узгоджених накопичувачів, а саме – електрохімічного накопичувача енергії на основі хімічних джерел струму, активного накопичувача кінетичної енергії і ємнісного накопичувача на основі суперконденсаторів, об'єднаних загальною системою управління. Розроблено його схемотехнічне рішення і наведені основні розрахункові співвідношення для визначення енергетичних параметрів активного накопичувача кінетичної енергії.

**Ключові слова:** комбінований накопичувач енергії, електропривід, фотоелектростанція, активний накопичувач кінетичної енергії.

**Аннотация** Предложен комбинированный накопитель энергии для гарантированного бесперебойного электроснабжения электропривода системы ориентации солнечных батарей фотоэлектростанций, учитывающий особенности функционирования электропривода в условиях нештатной эксплуатации. Накопитель представляет собой комбинацию трех видов взаимосвязанных и функционально согласованных накопителей, а именно – электрохимического накопителя энергии на основе химических источников тока, активного накопителя кинетической энергии и емкостного накопителя на основе суперконденсаторов, объединенных общей системой управления. Разработано его схмотехническое решение и приведены основные расчетные соотношения для определения энергетических параметров активного накопителя кинетической энергии.

**Ключевые слова:** комбинированный накопитель энергии, электропривод, фотоэлектростанция, активный накопитель кинетической энергии.

**Abstract** The combined energy storage unit is proposed for the guaranteed uninterrupted power supply to the electric drive of the solar cell orientation systems of photoelectric power station, considering features of functioning of the electric drive in the conditions of emergency operation. The store is a combination of three types of interconnected and functionally consistent stores, namely, the electrochemical energy storage based on chemicals that provide kinetic energy and energy storage based on supercapacitors, united by a common control system. Its circuitry research is developed and the main settlement ratios for determination of power parameters of the active storage of kinetic energy are received.

**Keywords:** combined energy storage, electric drive, photoelectric power station, active storage of kinetic energy.

### Введение

Создание высокоэффективных фотоэлектростанций (ФЭС) невозможно без использования систем ориентации солнечных батарей (СБ). Применение систем слежения за Солнцем обеспечивает наибольший приход солнечного излучения на поверхность СБ, что способствует увеличению выходной мощности ФЭС и интервала генерирования электрической энергии. Основным потребителем энергии в системе слежения является электропривод опорно-поворотных механизмов трекерных комплексов ФЭС. Несмотря на сравнительно большое количество имеющихся публикаций, посвященных системам ориентации солнечных батарей, недостаточное внимание уделяется вопросам рационального выбора типа и состава накопителя для бесперебойного гарантированного электропитания привода следящей системы ФЭС.

### Цель работы

Повышение надежности электроснабжения электропривода следящей системы ФЭС.

### Постановка задачи

Обоснование состава и разработка схмотехнического решения накопителя энергии для обеспечения гарантированного бесперебойного электроснабжения электропривода следящей системы ФЭС.

### Основная часть

Практически отслеживание положения Солнца осуществляется путем циклического поворота солнечной батареи на  $2,5^\circ$  каждые десять минут. При пуске электродвигатель привода потребляет достаточно большой ток в течение сравнительно короткого промежутка времени, что является серьезной нагрузкой для блока электропитания на базе аккумулятора. Учитывая то обстоятельство, что химические источники тока относятся к инерционным системам в силу особенностей протекания электрохимических процессов, использование аккумуляторов для питания импульсных нагрузок значительно уменьшает их эффективность и сокращает срок эксплуатации.

Для иллюстрации работы электропривода в одном цикле поворота солнечных батарей в качестве примера на рис. 1 приведена диаграмма режима работы электропривода с использованием шагового двигателя (ШД) [1].

В приведенном примере при пуске ШД с механизмом поворота необходимо преодолеть пусковой

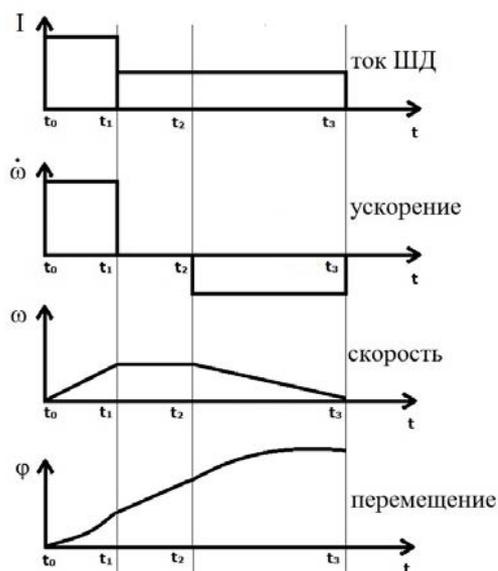


Рис. 1. Диаграмма режима позиционирования

момент двигателя, зависящий от величины нагрузки, и нелинейный момент сухого трения механизма поворота, который меняется в силу изменений температуры окружающей среды и атмосферного давления. В этом режиме целесообразно в электроприводе увеличить амплитуду тока ШД (теоретически пусковой ток необходимо увеличить до 1,5 от номинального значения). После преодоления пускового момента и начального момента сухого трения можно снизить амплитуду тока ШД (рабочий ток уменьшить до 0,8 от номинального значения). Это позволяет исключить сбои при пуске ШД и в целом уменьшить потребление тока двигателем во время поворота. Увеличение пускового тока в ШД целесообразно в режиме позиционирования при положительном значении ускорения, как это следует из рис. 1.

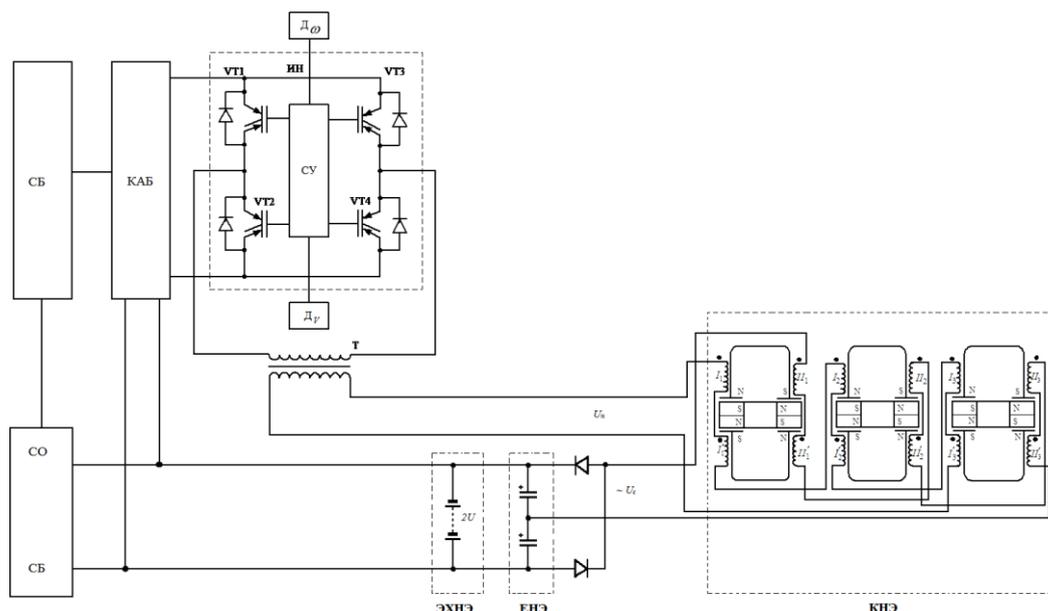
Для обеспечения эффективного использования электрической энергии, генерируемой солнечными батареями и, в то же время, обеспечения эффективной работы системы ориентации СБ авторы [2] предлагают использовать гибридный накопитель энергии на базе аккумулятора и блока суперконденсаторов. Функцию основного источника питания в таком гибридном накопителе выполняет химический источник тока, или аккумулятор, но при высоком уровне импульсного тока нагрузки в момент включения электропривода для уменьшения падения напряжения на аккумуляторе функцию источника питания выполняет суперконденсатор. Это связано с тем, что плотность энергии у аккумулятора высокая, а плотность мощности низкая, тогда как у суперконденсатора, наоборот – плотность энергии низкая, а плотность мощности высокая.

Как показывает опыт эксплуатации ФЭС в условиях влияния нагрузок, превышающих допустимые расчетные величины, вызванными внешними факторами, такими, например, как повышенные ветровые нагрузки, увеличенный снежный покров и другие возможные неучтенные нагрузки [3], время выхода электропривода на штатный режим поворота СБ может превысить время разряда блока суперконденсаторов, которое составляет от  $10^{-3}$  секунд до единиц секунд. В таких условиях нагрузка на аккумулятор при повороте СБ возрастает, что приводит к сокращению срока службы аккумулятора.

Одним из вариантов увеличения временного интервала разряда накопителя является включение в состав гибридного накопителя маховикового накопителя кинетической энергии, который позволит расширить временной диапазон разряда накопителя, соответствующий временным характеристикам компенсируемых воздействий в цепи электроснабжения электропривода в процессе цикла поворота солнечной батареи.

Авторами настоящей работы предложен вариант комбинированного накопителя энергии, который включает в себя электрохимический накопитель (ЭХНЭ) на основе химического источника тока, емкостной накопитель электрической энергии (ЕНЭ) на основе батарей суперконденсаторов и активный накопитель кинетической энергии (КНЭ) с совмещенными функциями двигателя-генератора на основе буферного накопителя кинетической энергии, подробное описание которого приведено в [4].

Блок-схема ФЭС с комбинированным накопителем энергии приведена на рис. 2, на которой электрическая схема накопителя кинетической энергии представлена в развернутом виде.



**Рис. 2. Блок-схема комбинированного накопителя энергии:**

**СБ – солнечная батарея; КАБ – контроллер аккумуляторной батареи; СУ – система управления;  
СО СБ – система ориентации солнечной батареи; ЭХНЭ – электрохимический накопитель энергии;  
ЕНЭ – емкостной накопитель энергии; КНЭ – кинетический накопитель энергии**

При реализации комбинированного накопителя энергии значения параметров электрохимического и емкостного накопителей определяются с использованием известных выражений в зависимости от параметров конкретного типа электропривода.

В виду относительной сложности активного накопителя кинетической энергии вкратце опишем его конструктивные особенности, принцип действия и выведем основные расчетные соотношения для определения его энергетических параметров.

Для наглядности на рис. 3 приведена конструкция активного накопителя кинетической энергии.

Основными элементами накопителя являются размещенные в корпусе 1 статоры 2 и 3, выполненные в виде U-образных магнитопроводов с расположенными на них двигательной обмоткой 4 и генераторной обмоткой 5. В зазоре между магнитопроводами на вертикальном валу 6 вращается массивный ротор-маховик 7 с вмонтированными в нем аксиально по окружности радиусом  $R$  постоянными дискообразными магнитами 8. Расстояния между геометрическими центрами рядом расположенных постоянных магнитов 8 равны расстояниям между геометрическими центрами полюсных наконечников 10 магнитопроводов.

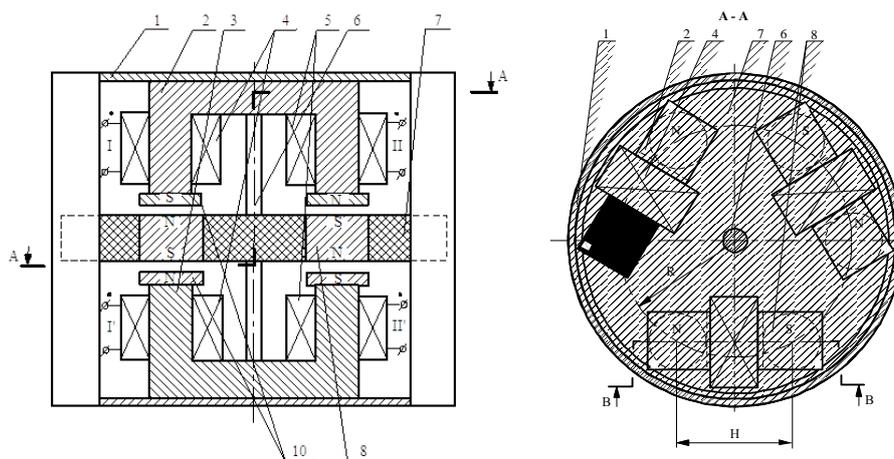


Рис. 3. Конструкция активного накопителя кинетической энергии

Принцип функционирования активного накопителя кинетической энергии состоит в следующем.

Двигательная обмотка 4 подключается к источнику переменного тока малой мощности, в качестве которого используется аккумуляторная батарея и инвертор. При этом в магнитопроводах статоров 2 и 3 наводится магнитный поток, который взаимодействует с постоянными магнитами 8, размещенными в диске ротора-маховика 7. Так как постоянные магниты 8 расположены с чередованием полюсов, то при смене направления индукции магнитного потока в зазоре между статорами и ротором-маховиком за период колебания синусоидального напряжения в обмотке 4 постоянные магниты, находящиеся в зоне взаимодействия с полюсными наконечниками 10 статоров, выталкиваются из этой зоны при совпадении полюсов магнитов и полюсных наконечников магнитопроводов статоров, а следующие за ними по ходу вращения ротора-маховика постоянные магниты с противоположными полюсами втягиваются в зону взаимодействия с полюсными наконечниками магнитопроводов статоров, приводя диск ротора-маховика во вращение со скоростью, определяемой частотой внешнего источника тока, то есть вращение ротора-маховика осуществляется за счет втягивания в зону взаимодействия части постоянных магнитов с разноименными по отношению к наконечникам магнитопроводов полюсами при одновременном выталкивании из зоны взаимодействия другой части постоянных магнитов, имеющих одноименные полюса по отношению к наконечникам магнитопроводов статоров.

Такой механизм взаимодействия постоянных магнитов ротора-маховика с магнитопроводами статора повышает интенсивность магнитного потока в зазоре между полюсными наконечниками магнитопроводов статоров и ротором-маховиком, а, следовательно, и коэффициент полезного действия активного накопителя кинетической энергии. При вращении ротора-маховика приобретает запас кинетической энергии. Одновременно при этом магнитный поток, создаваемый постоянными магнитами 8, вмонтированными в диск ротора-маховика, замыкается через магнитопроводы статоров 2 и 3 и наводит в обмотках 4 и 5 электродвижущую силу. Вследствие того, что постоянные магниты 8 расположены с чередующейся полярностью магнитных полюсов, наводимая в обмотках 4 и 5 электродвижущая сила будет иметь синусоидальную форму, частота которой определяется скоростью вращения ротора-маховика. В итоге кинетическая энергия, запасенная в массивном роторе-маховике во время вращательного движения, преобразовывается в электрическую энергию путем наведения электродвижущей силы в обмотках статоров маг-

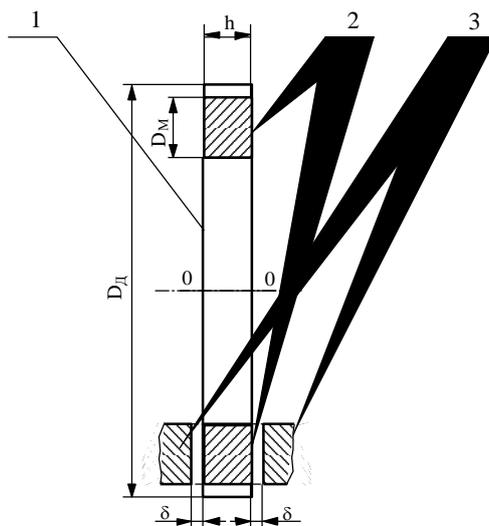
нитным потоком, создаваемым постоянными магнитами ротора при их движении в зазоре между полюсными наконечниками магнитопроводов статоров.

Приведем расчетные соотношения для определения основных параметров активного накопителя кинетической энергии, выраженных через массогабаритные и магнитные параметры вращающейся магнитной системы ротора-маховика.

Расчетная модель ротора-маховика буферного накопителя кинетической энергии приведена на рис. 4, на которой введены следующие обозначения: 1 – диск ротора-маховика, выполненный из немагнитного материала толщиной  $h$ , 2 – постоянные магниты, 3 – магнитопровод катушки возбуждения статора,  $D_D$  – диаметр диска ротора,  $D_M$  – диаметр маховика,  $\delta$  – воздушный зазор.

Общее уравнение движения маховика с моментом инерции  $J$  имеет вид:

$$M - M_C = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$



**Рис. 4. Расчетная модель ротора-маховика активного накопителя кинетической энергии**

где  $M_C$  – момент сопротивления (трение в подшипниках, аэродинамическое трение и т.д.),  $\omega$  – угловая скорость.

Время рекуперации определяется из уравнения (1) и в общем виде может быть выражено соотношением [5]:

$$t = \int_{\omega'}^{\omega} - \frac{J d\omega}{M + M_C}, \quad (2)$$

где  $\varphi$  – глубина реализуемого разряда маховика, обычно  $\varphi \cong (1/2 \div 1/3)W$ .

Для накопительной системы с маховиком считается оптимальным такой режим рекуперации, при котором отдается половина запасенной в маховике энергии, то есть  $\varphi = 1/2 W$ . В этом случае  $W' = 1/2 W$ , следовательно  $J \frac{\omega'^2}{2} = 0,5J \frac{\omega^2}{2}$ , откуда

$$\omega' = \omega \sqrt{0,5} \cong 0,71\omega, \quad (3)$$

где  $\omega'$  – угловая скорость маховика при глубине реализуемого разряда  $\varphi = 1/2 W$  на момент окончания времени рекуперации.

Из (3) следует, что при  $\varphi = 1/2 W$  угловая скорость маховика снижается примерно на 29 %, а при угловой скорости  $\omega < \omega'$  запасенная в маховике энергия остается нереализуемой.

Для практических расчетов удобно выразить момент  $M$  маховика через активную мощность  $P$ , отдаваемую потребителю. В предположении, что во время рекуперации величина активной мощности  $P$  неизменна [6], выражение для момента  $M$  маховика примет вид:

$$M = \frac{P}{\omega}, \quad (4)$$

Подставив (3) и (4) в выражение (2), получим:

$$t = \int_{\omega}^{\omega'} - \frac{Jd\omega}{M+M_C} = J \int_{\omega}^{\omega'} \frac{d\omega}{P/\omega+M_C} = \frac{J}{M_C} \int_{\omega}^{\omega'} \frac{\omega d\omega}{P/M_C+\omega}. \quad (5)$$

После соответствующих преобразований получим выражение для времени рекуперации в виде

$$t = 0,29 \frac{J\omega}{M_C} + \frac{JP}{M_C^2} \ln \frac{P+0,29\omega M_C}{P+\omega M_C}. \quad (6)$$

Для перехода к массогабаритным параметрам маховика выразим момент инерции  $J$  через его массу и радиус:

$$J = \frac{m \cdot R_d^2}{2}, \quad (7)$$

где  $m = \pi R_d^2 h \cdot \rho_d$  – масса ротора-маховика,  $R_d$  – радиус диска ротора,  $h$  – толщина диска ротора,  $\rho_d$  – плотность материала диска.

С учетом массы магнитной системы выражение для массы ротора - маховика примет вид:

$$m = \pi R_d^2 h \cdot \rho_d + n R_M^2 h \cdot \rho_M - n \pi R_M^2 h \cdot \rho_d = \pi h [R_d^2 \cdot \rho_d + n R_M^2 (\rho_M - \rho_d)], \quad (8)$$

где  $R_M$  – радиус постоянного магнита,  $\rho_M$  – плотность материала магнита,  $n$  – количество постоянных магнитов в системе.

После соответствующих преобразований получим значение момента инерции ротора-маховика, выраженный через его массогабаритные параметры:

$$J = \frac{\pi R_d^2 h}{2} [R_d^2 \cdot \rho_d + n R_M^2 (\rho_M - \rho_d)]. \quad (9)$$

Принимая во внимание, что основной вклад в величину  $M_C$  вносит сила притяжения постоянного магнита ротора к магнитопроводу катушки возбуждения статора, момент сопротивления  $M_C$  можно определить через произведение намагничивающей силы  $F_M$  на плечо, равное радиусу диска ротора

$$M_C = F_M \cdot R_d. \quad (10)$$

Намагничивающая сила  $F_M$  может быть определена из выражений для магнитного потока, создаваемого постоянным магнитом в зазоре магнитопровода

$$\Phi_{\delta} = F_M \cdot \frac{\lambda_{\delta}}{\kappa_{\mu}}, \quad (11)$$

где  $\Phi_{\delta}$  – магнитный поток в зазоре;  $F_M$  – намагничивающая сила постоянного магнита;  $\lambda_{\delta}$  – магнитная проводимость зазора;  $\kappa_{\mu}$  – коэффициент насыщения, равный  $1,05 \div 1,2$ , откуда:

$$F_M = \frac{\Phi_{\delta} \kappa_{\mu}}{\lambda_{\delta}}. \quad (12)$$

Суммарный поток рассеяния между магнитами ротора при их расположении с чередующейся полярностью равен:

$$\Phi_{\sigma} = F_M \cdot \lambda_{\sigma M}, \quad (13)$$

где  $\lambda_{\sigma M}$  – суммарная магнитная проводимость путей рассеяния.

В общем виде поток магнитной индукции  $\Phi$  постоянного магнита определяется как

$$\Phi = k B \cdot S_M, \quad (14)$$

где  $B$  – магнитная индукция;  $S_M$  – площадь сечения полюса магнита;  $k$  – коэффициент пропорциональности.

В конкретном случае, если предположить, что зависимость магнитной индукции от коэрцитивной силы магнитного материала  $B_r = f(H_c)$  линейна, что имеет место в случае использования высококоэрци-

тивных постоянных магнитов на основе NdFeB, то создаваемый ими магнитный поток можно представить выражением [7]:

$$\Phi_M = B_r \cdot S_M - \mu_0 \mu_M \cdot F_M \cdot S_M / h, \quad (15)$$

где  $B_r$  – остаточная магнитная индукция;  $S_M = \pi R_M^2$  – площадь полюса постоянного магнита;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;  $\mu_M = B_r / \mu_0 H_c$  – магнитная проницаемость материала постоянного магнита;  $H_c$  – коэрцитивная сила магнита по индукции (паспортные данные).

С учетом приведенных выше выражений определим намагничивающую силу в зазоре  $\delta$ :

$$F_M = \frac{B_r \cdot S_M}{\frac{\lambda_\delta}{\kappa_\mu} + \lambda_{\sigma M} + \frac{\mu_M \cdot S_M}{h}}, \quad (16)$$

а, следовательно, и момент сопротивления  $M_C$ , созданный этой силой

$$M_C = \frac{B_r \cdot S_M \cdot R_D}{\frac{\lambda_\delta}{\kappa_\mu} + \lambda_{\sigma M} + \frac{\mu_M \cdot S_M}{h}}. \quad (17)$$

В результате дальнейших преобразований выражение для определения времени рекуперации с учетом того, что при отдаче половины запасенной энергии скорость вращения ротора-маховика станет равной  $0,71\omega$ , примет вид:

$$t = \frac{\pi h [R_D^2 \cdot \rho_D + n R_M^2 (\rho_M - \rho_D)] \left( \frac{\lambda_\delta}{\kappa_\mu} + \lambda_{\sigma M} + \frac{\mu_M \cdot S_M}{h} \right)}{2 B_r \cdot S_M} \times \left[ 0,29\omega + \frac{P \left( \frac{\lambda_\delta}{\kappa_\mu} + \lambda_{\sigma M} + \frac{\mu_M \cdot S_M}{h} \right)}{B_r \cdot S_M} \cdot \frac{\ln \frac{P + 0,29\omega \cdot B_r \cdot S_M \cdot R_D}{\frac{\lambda_\delta}{\kappa_\mu} + \lambda_{\sigma M} + \frac{\mu_M \cdot S_M}{h}}}{P + \frac{B_r \cdot S_M \cdot R_D \cdot w}{\frac{\lambda_\delta}{\kappa_\mu} + \lambda_{\sigma M} + \frac{\mu_M \cdot S_M}{h}}} \right]. \quad (18)$$

Выражение (18) позволяет определить зависимость времени рекуперации активного накопителя кинетической энергии от величины мощности, отдаваемой потребителю. При этом в качестве расчетных величин используются массогабаритные и магнитные параметры ротора-маховика.

Необходимые значения параметров активного накопителя кинетической энергии определяются в зависимости от параметров конкретного типа электропривода.

Алгоритм разделения мощности за время одного цикла поворота описывается следующим образом:

- 1) при всех режимах работы основным источником энергии является химический источник тока;
- 2) в момент пуска двигателя электропривода энергия подводится от маховикового накопителя;
- 3) после завершения импульса пускового тока энергия подводится от суперконденсатора;
- 4) после набора постоянной скорости вращения поворотного механизма источником энергии является химический источник тока;
- 5) при снижении запаса энергии суперконденсатора до критического уровня происходит его полная зарядка постоянной мощностью от химического источника тока.
- 6) после завершения цикла поворота кинетическая энергия рекуперирована в суперконденсаторе и частично в химический источник тока для восстановления степени его заряженности.

## Выводы

Разработан комбинированный накопитель, представляющий собой комбинацию трех видов взаимосвязанных и функционально согласованных накопителей, а именно – электрохимического накопителя энергии на основе химических источников тока, активного накопителя кинетической энергии и емкостного накопителя на основе суперконденсаторов, объединенных общей системой управления. Предложен алгоритм его работы. На основании полученных результатов можем сделать вывод, что разработанное схемотехническое решение комбинированного накопителя энергии способно обеспечить надежное бесперебойное энергообеспечение электропривода следящей системы фотоэлектростанции.

## Список использованных источников

1. Шиняков, Ю. А. Автономная фотоэлектрическая энергетическая установка [Текст] / Ю. А. Шиняков, Ю. А. Шурьгин, В. В. Аржанов, О. А. Теуцаков, А. В. Осипов, К. В. Аржанов // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 4. – С. 133–138.
2. Изотов, В. Ю. Гибридный источник питания для системы ориентации солнечных батарей [Текст] / В. Ю. Изотов, Н. И. Ключ, А. В. Макаров, и др. // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2014. – Вип. 1 (84). – С. 44–48.

3. Кувшинов, В. В. Исследование сезонной работы промышленного фотоэлектрического модуля PS 250 [Текст] / В. В. Кувшинов, Е. Г. Какушина, А. Г. Косий // Энергетические установки и технологии. – 2017. – Т.3. – №3. – С. 73–78.
4. Патент України по заявці № а2006 06729, МПК 7 H02 К 1/12, Буферний накопичувач кінетичної енергії / М. Я. Житник, Ю. І. Ліпський, С. В. Плаксін, Л. М. Погоріла, І. І. Соколовський; власник Інститут транспортних систем і технологій НАНУ «Трансмаг». – від 16.06.2006.
5. Будник, В. С. Инерционные механические энергоаккумулирующие системы [Текст] / В. С. Будник, Н. Ф. Свириденко, В. Н. Кузнецов и др. – К.: Наукова думка, 1986. – 176 с.
6. Накопители энергии: Учебное пособие для вузов [Текст] / Д. А. Бут, Б. Л. Алиевский, С. Р. Мизюрин, П. В. Васюкевич. // Под ред. Д. А. Бута. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.
7. Белый, П. Н. Моментный магнитоэлектрический двигатель дисковой конструкции [Текст] / П. Н. Белый. // Технічна електродинаміка. – 1998. – № 4. – С. 74–77.

**Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.**

УДК 621.311.004

**А. А. Колб, Ант. А. Колб, Д.В. Ципленков канд-ти техн. наук**

(Україна, Дніпро, Національний технічний університет "Дніпровська політехніка")

**А.В. Бобров кан-т техн. наук**

(Україна, Дніпро, Коледж ракетно-космічного машинобудування Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара)

## **ВПЛИВ ВНУТРІШНІХ І ПЕРЕХРЕСНИХ ЗВОРОТНИХ ЗВ'ЯЗКІВ НА ДИНАМІКУ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ**

**Анотація.** *Можливість регулювання миттєвих значень потокозчеплення і моменту двигуна дозволяє реалізувати швидкодіючі приводи з високою точністю регулювання в сталому і перехідному режимах. Отримано рівняння асинхронного двигуна в обертовий з синхронною швидкістю системою координат  $x, y$ , дійсна вісь якої орієнтована по потокозчепленню ротора. На основі наведених рівнянь наведена структурна схема асинхронного двигуна з синхронно обертовою системою координат, орієнтованою по вектору потокозчеплення ротора. Розроблена функціональна схема регулювання моменту та потоку асинхронного двигуна на основі АІН з ШІМ та структурна схема частотно-регульованого асинхронного електроприводу на базі АІН-ШІМ.*

**Ключові слова:** асинхронний електропривод, потокозчеплення, частотне регулювання.

**Аннотация.** *Возможность регулирования мгновенных значений потокозчепления и момента двигателя позволяет реализовать быстродействующие приводы с высокой точностью регулирования в установившемся и переходном режимах. Получены уравнения асинхронного двигателя во вращающейся с синхронной скоростью системой координат  $x, y$ , действительная ось которой ориентирована по потокозчеплению ротора. На основе приведенных уравнений получена структурная схема асинхронного двигателя в синхронно вращающейся системе координат, ориентированной по вектору потокозчепления ротора. Разработана функциональная схема регулирования момента и потока асинхронного двигателя на основе АИИ с ШИМ и структурная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода на базе АИИ-ШИМ.*

**Ключевые слова:** асинхронный электропривод, потокозчепление, частотное регулирование.

**Abstract.** *The ability to control the instantaneous values of the flux linkage and the motor torque makes it possible to realize high-speed drives with high control accuracy in the steady state and transient modes. The equations of an asynchronous engine are obtained in a coordinate system  $x, y$  rotating at a synchronous speed, whose real axis is oriented along the rotor flux linkage. Based on the above equations, a structural diagram of an asynchronous motor in a synchronously rotating coordinate system oriented along the rotor flux linkage vector is obtained. A functional scheme for controlling the moment and flow of an asynchronous motor based on AVI with PWM and a block diagram of a frequency-controlled asynchronous electric drive based on AVI-PWM has been developed.*

**Keywords:** asynchronous electric drive, linkage, frequency regulation.

**Актуальність роботи.** Тенденція розвитку частотно-регульованих приводів така, що область їх застосування постійно розширюється. Можливість регулювання миттєвих значень потокозчеплення і мо-