

DOI: 10.17516/1999-494X-0426

УДК 621.311.6

The Procedure of Selection of Flywheel Energy Storage as an Autonomous Power Source

Mikhail E. Blinnikov*

*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 26.03.2022, received in revised form 22.08.2022, accepted 19.09.2022

Abstract. The market of flywheel energy storages is widely represented by various devices with different characteristics and areas of application. However, there is still no standard procedure of flywheel storage devices selecting, which could be unifying to several analytical expressions. The stock-produced flywheel energy storages selection is solved by determining the number of flywheel modulars and the mode of their operations during discharge. The article proposes a flywheel energy storages selection procedure according to the principles of the power and energy balances of the system. The selection criteria basic expressions are obtained in general form. Numerical examples of the choice of storage devices with cascade and parallel discharge modes are considered. The selection criteria of flywheel energy storage system with cascade operation mode is reduced to optimization task, for which the objective function, boundary conditions and a constraint system are defined. The numerical solution is obtained using the Solver of MS Excel.

Keywords: flywheel drive, selection conditions, selection technique, cascade power supply.

Citation: Blinnikov, M. E. The procedure of selection of flywheel energy storage as an autonomous power source. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(6), 691–701. DOI: 10.17516/1999-494X-0426

Методика выбора маховичных накопителей энергии в качестве источника автономного питания

М. Е. Блинников

*Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. Выбор электромаховичных накопителей как готовых устройств сводится к определению числа накопителей и схем их включения при разряде. В статье предложена методика выбора электромаховичных накопителей согласно принципам баланса мощности и энергии системы. Получены основные выражения условий выбора в общем виде. Рассмотрены численные примеры выбора накопителей при каскадной и параллельной схемах разряда. Решение для каскадной схемы работы сведено к задаче оптимизации, определены целевая функция, граничные условия и система ограничений. Численное решение получено с помощью инструмента «Поиск решения» пакета MS Excel.

Ключевые слова: маховичный накопитель, условия выбора, методика выбора, каскадная схема питания.

Цитирование: Блинников, М.Е. Методика выбора маховичных накопителей энергии в качестве источника автономного питания / М.Е. Блинников // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(6). С. 691–701. DOI: 10.17516/1999-494X-0426

Введение

Под электромаховичным накопителем будем понимать маховичный накопитель вместе с электромеханическим преобразователем. Такое единое устройство получает питание от электрической сети, хранит энергию в виде механической энергии вращения и при разряде генерирует выходную электрическую мощность для питания электроприёмников. В дальнейшем электромаховичный накопитель будем обозначать общим термином маховичный или сокращённо МНЭ.

Сегодня рынок маховичных накопителей предлагает множество устройств и систем как зарубежных, так и отечественных производителей. В основном это источники бесперебойного питания, но есть и системы для регулирования частоты [1], и устройства аккумулялирования энергии в системах нетрадиционной энергетики [2].

Выбор маховичных накопителей как готовых устройств сводится к определению числа накопителей и схем их включения при разряде. Если накопители будут разряжаться на целевого потребителя не параллельно, а каскадно (ступенями или последовательно), то дополнительно необходимо определить время работы каждой ступени.

Цель данной работы – получение методики выбора существующих электромаховичных накопителей энергии, что положительно скажется на стандартизации данных устройств и распространении на действующих и вновь вводимых объектах.

Условия выбора электромаховичных накопителей

Условия выбора маховичных накопителей являются необходимыми, поскольку их невыполнение исключает возможность применения рассматриваемого варианта. Условия выбора построены на принципах баланса мощности и энергии.

Если рассматриваемый накопитель рассчитан на использование, которое не меньше требуемого времени автономной работы (в режиме разряда), то рассматривается параллельная работа накопителей. Такие условия выбора имеют два вида.

1. Выбор числа накопителей по ёмкости, шт.:

$$n_{\text{МНЭ}} \geq n_{\text{МНЭ}}^{\text{р}} = \frac{W_{\text{р}}}{W_{\text{МНЭ}} - t_{\text{раб}}(p_{\text{смп}} + P_{\text{МНЭ}}^{\text{СН}})}, \quad (1)$$

где $n_{\text{МНЭ}}$ – минимальное требуемое количество накопителей (целое число), шт.; $n_{\text{МНЭ}}^{\text{р}}$ – расчётное требуемое количество накопителей, шт.; $W_{\text{р}}$ – расчётный запас энергии, потребляемый нагрузкой, которая будет выделяться на автономную работу от маховичного накопителя в течение заданного времени, кВт·ч; $W_{\text{МНЭ}}$ – номинальная, располагаемая, гарантированная или другая величина ёмкости маховичного накопителя, на которую рассчитан накопитель по данным завода-изготовителя, кВт·ч; $P_{\text{МНЭ}}^{\text{СН}}$ – мощность системы собственных нужд одного маховичного накопителя энергии, кВт; $p_{\text{смп}}$ – удельный часовой саморазряд маховичного накопителя (может быть представлен средней величиной $p_{\text{смп,ср}}$ или зависимостью от времени разряда $p_{\text{смп}}(t)$, кВт); $t_{\text{раб}}$ – время работы маховичного накопителя в режиме разряда, ч.

2. Выбор числа накопителей по мощности, шт.:

$$n_{\text{МНЭ}} \geq n_{\text{МНЭ}}^{\text{р}} = \frac{P_{\text{р}} + P_{\text{МНЭ}}^{\text{СН}}}{P_{\text{МНЭ}}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{МНЭ}}$ – выходная мощность накопителя, соответствующая требуемому времени работы, кВт; $P_{\text{р}}$ – расчётная мощность нагрузки, подключаемой к накопителю, кВт.

Из двух условий (1) и (2) выбирается большее значение $n_{\text{МНЭ}}$, удовлетворяющее обоим условиям.

При последовательной работе накопителей, когда разряд осуществляется ступенями, каждая ступень должна не только питать целевого потребителя, но и поддерживать полный заряд остальных ступеней, которым только предстоит включиться в работу. Такую систему питания назовём каскадной.

Упрощённо представив характеристики саморазряда накопителей и мощность потребления целевой нагрузки средними значениями, получим выражение энергии, потребляемой на i -ой ступени питания, кВт·ч:

$$W_i^{\text{п}} \approx \Delta t_i \left(P_{\text{нр}} + n_{\text{МНЭ}_i} \Delta p_{\text{смп,ср}} + n_{\text{под}_i}^{\text{МНЭ}} \Delta p_{\text{под,ср}}^{\text{МНЭ}} \right), \quad (3)$$

где $P_{\text{нр}}$ – мощность нагрузки целевого потребителя при работе i -ой ступени, кВт; $\Delta p_{\text{смп,ср}}$ – среднее значение мощности потерь от саморазряда маховичного накопителя (величина среднего часового саморазряда), кВт; $\Delta p_{\text{под,ср}}^{\text{МНЭ}}$ – среднее значение потерь, определяющее мощность, необходимую на поддержание полного заряда маховичного накопителя, кВт; $n_{\text{МНЭ}_i}$ – количество маховичных накопителей в i -ой ступени питания, шт; $n_{\text{под}_i}^{\text{МНЭ}}$ – количество маховичных накопителей, поддерживаемых в полностью заряженном состоянии i -ой ступенью питания, шт.; Δt_i – продолжительность работы i -ой ступени питания, ч.

Без учёта подпитки каждой ступени от накопителей предыдущей ступени выражение для источников имеет вид, кВт·ч:

$$W_i^\Gamma = n_{\text{МНЭ}_i} \int_{t_i}^{t_{i+1}} p_{\text{МНЭ}}(t) dt, \quad (4)$$

где $n_{\text{МНЭ}_i}$ – количество маховичных накопителей в i -ой ступени питания, шт; $p_{\text{МНЭ}}(t)$ – зависимость выходной мощности накопителя от времени работы, кВт.

Зависимость выходной мощности $p_{\text{МНЭ}}(t)$ является экспериментальной кривой, которую производитель может прикладывать к техническим данным накопителя. Для выполнения расчётов кривую нужно заменить приближённой аналитической с точностью, определяемой необходимостью конкретной задачи.

Приближённое количество накопителей для каскадной схемы можно оценить следующим образом, шт.:

$$n_{\text{МНЭ}}^{\text{прибл}} = \frac{W_p}{W_{\text{МНЭ}} - t_{\text{раб.макс}}^{\text{МНЭ}} \Delta p_{\text{МНЭ}}}, \quad (5)$$

где $t_{\text{раб.макс}}^{\text{МНЭ}}$ – наибольшее время работы накопителя в режиме отбора мощности, ч; $\Delta p_{\text{МНЭ}}$ – потери мощности в электромаховичном накопителе в целом, среднее значение, может быть использована средняя величина потерь от саморазряда, собственные нужды накопителя, например, мощность вакуумного насоса, подвеса, потери в моторе-генераторе, кВт.

Примеры применения методики выбора электромаховичных накопителей

Выберем накопитель располагаемой ёмкостью 30 кВт·ч с наибольшим временем работы 35 минут на минимальной выходной мощности 50 кВт [1]. Примем следующие данные для расчёта: $p_{\text{смз.ср}} = 9$ кВт, $\Delta p_{\text{подср}}^{\text{МНЭ}} = 3$ кВт. Значение $\Delta p_{\text{подср}}^{\text{МНЭ}}$ принято по данным завода-изготовителя [1], а значение $p_{\text{смз.ср}}$ ориентировочно увеличено в три раза из следующих соображений. Рассматриваемые потери складываются из потерь в электромеханическом преобразователе, потерь в электропреобразовательных устройствах (выпрямитель, фильтр, инвертор), а также вспомогательных устройствах управления и контроля. Потери на поддержание характерны работе электромеханического преобразователя МНЭ в качестве двигателя, электромагнитный момент которого уравнивает момент сопротивления маховика. При этом двигатель работает в режиме, близком к холостому ходу. При разряде имеет место генераторный режим работы электрической машины, в котором ток нагрузки определяется работой на целевого потребителя, что обуславливает рост переменных потерь в электрической машине и электропреобразовательных устройствах.

В качестве объекта исследования рассмотрим систему собственных нужд электрической подстанции с усреднённой мощностью нагрузки 170,8 кВт. Минимальное время работы системы в автономном режиме составляет 2 часа [3]. С учётом коэффициента запаса 1,3 необходимый запас энергии составит 444,1 кВт·ч. Так как время работы накопителя меньше требуемого времени автономной работы, используем расчёт для каскадной схемы питания.

Выберем возможное количество ступеней каскадной системы питания, то есть 4. Это количество является минимальным, потому что наибольшее время работы накопителя составляет 35 минут. Задачу выбора времени работы каждой ступени и количества накопителей на каждой

ступени удобно рассматривать как задачу оптимизации. Для создания математической модели задачи оптимизации необходимо определить целевую функцию, содержащую критерий оптимальности, граничные условия и ограничения [4, 5, 6].

Целевой функцией, подлежащей максимизации, является КПД системы за полуцикл разряда, то есть за время автономной работы, о.е.:

$$\eta = \frac{P_{\text{нг.ср}} \sum_i^n \Delta t_i}{\sum_i^n P_{pi} \Delta t_i}, \quad (6)$$

где P_{pi} – расчётная мощность нагрузки i -ой ступени, кВт; $P_{\text{нг.ср}}$ – усреднённая мощность по расчётному объёму энергии (поясим позже), кВт; Δt_i – продолжительность работы i -ой ступени, ч; i – номер ступени, о.е.; n – количество ступеней, шт.

Поскольку оптимизации подлежит только один критерий, поставленная задача является однокритериальной.

Граничные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} \Delta t_i &\geq 0, \\ \Delta t_i &\leq t_{\text{раб.макс}}^{\text{МНЭ}}, \\ n_{\text{МНЭ}_i} &\geq 0, \\ n_{\text{МНЭ}_i} &\text{ – целое.} \end{aligned} \quad (7)$$

Время работы ступени Δt_i – непрерывная переменная в заданном диапазоне, количество параллельно включённых накопителей на ступени $n_{\text{МНЭ}_i}$ – целочисленная переменная.

Ограничения имеют вид:

$$\begin{aligned} \sum_i^n \Delta t_i &= t_{\text{авт}}, \\ P_{pi} &\leq P_{\text{р.доп}i}, \\ \sum_i^n n_{\text{МНЭ}_i} &\geq n_{\text{МНЭ}}^{\text{прибл}}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $P_{\text{р.доп}i}$ – допустимое значение выходной мощности накопителя, характеризующееся временем работы i -ой ступени, то есть $P_{\text{МНЭ}}(t)$ в соответствии с выражением (4), кВт; P_{pi} – расчётная мощность i -ой ступени, кВт:

$$P_{pi} = P_{\text{нг.ср}} + n_{\text{МНЭ}_i} \Delta p_{\text{смз.ср}} + n_{\text{под}_i} \Delta p_{\text{под.ср}}, \quad (9)$$

где $P_{\text{нг.ср}}$ – усреднённая мощность нагрузки по энергии (допущение для упрощения расчётов), кВт; $\Delta p_{\text{смз.ср}}$ – среднее значение мощности, характеризующее часовой саморазряд маховичного накопителя, кВт; $\Delta p_{\text{под.ср}}$ – среднее значение потерь мощности, характеризующее поддержание полного заряда маховичного накопителя, кВт; $n_{\text{МНЭ}_i}$ – количество маховичных накопителей на i -ой ступени, шт; $n_{\text{под}_i}$ – количество маховичных накопителей, поддерживаемых в полностью заряженном состоянии i -ой ступенью, шт:

$$n_{\text{под}_i} = \sum_i^n n_{\text{МНЭ}_{i+1}}, \quad (10)$$

где n – количество ступеней, шт.

Определим приближённое количество накопителей по выражению (5), шт:

$$n_{\text{МНЭ}}^{\text{прибл}} = \frac{444,1}{30 - 0,58 \cdot 9} \approx 17,92, \quad (11)$$

то есть с учётом приблизительной оценки потерь минимальное требуемое количество накопителей равно 18.

Паспортную кривую выходной мощности, используемую в выражении энергии источников (4), в аналитическом виде можно получить с помощью инструмента «Линии тренда» средств MS Excel как полином третьей степени. Выбор типа линии тренда нужно производить для достижения требуемой точности. В графическом виде полученная аналитическая кривая выходной мощности приведена на рис. 1 под номером 2. Наибольшее значение отклонения этой кривой от паспортной составляет 2,7 %, среднее значение отклонения – 1,8 %, что является достаточной точностью приближения.

Выражение для аппроксимированной характеристики 2 выходной мощности имеет вид, кВт:

$$P_{\text{МНЭ}}(t) = -479,73t^3 + 857,2t^2 - 0,589t + 198,19, \quad (12)$$

где t – время разряда накопителя, ч.

Поскольку характеристика выходной мощности есть нелинейная функция, то и ограничения для расчётной мощности ступени в системе (8) нелинейны. Поэтому поставленная задача является задачей оптимизации нелинейного программирования [4, 6, 7]. Решение задачи оптимизации удобно выполнить с помощью инструмента «Поиск решения» пакета MS Excel [4, 8, 9, 10].

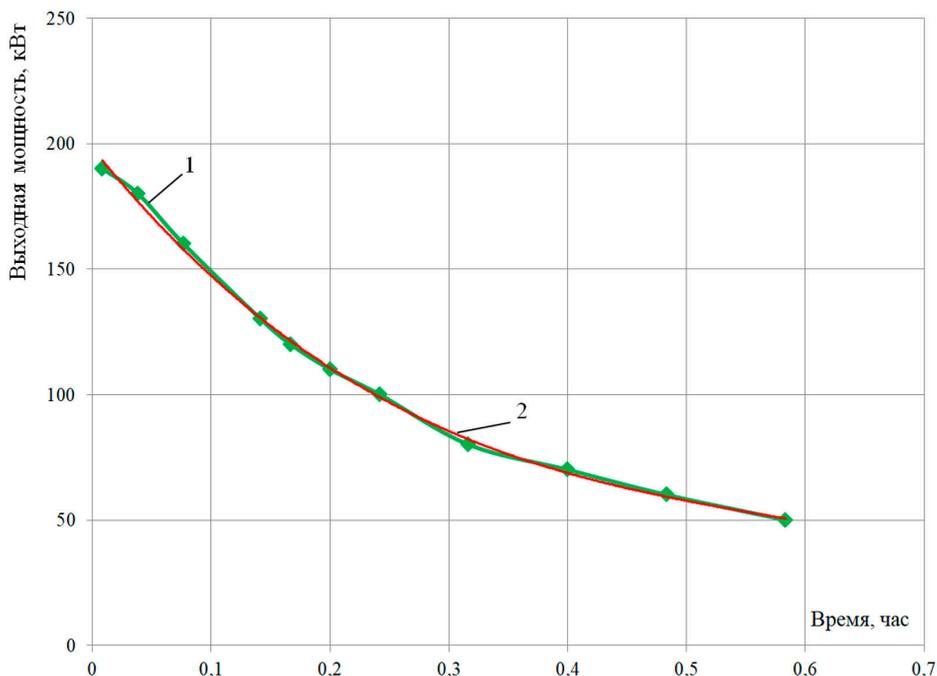


Рис. 1. Выходная мощность накопителя: 1 – паспортная кривая [1], 2 – аппроксимированная зависимость

Fig. 1. FES power output: 1 – passport [1], 2 – regression line

Применяя полученные условия и ограничения, а также связывающие выражения, запишем целевую функцию и создадим форму для решения в MS Excel [4, 10]. Изменяя количество накопителей и время работы каждой ступени, получим оптимальное решение при нулевых начальных условиях. Результаты решения приведены в табл. 1 и 2. Дополнительно введём обозначения расчётной энергии W_p , полной располагаемой энергии накопителей $W_{p,полн}$, величины неиспользованной энергии $\Delta W_{нерац}$ и доли использованной энергии от располагаемой $W_{исп}$.

Значение КПД в результате решения получилось равным 74,6 %, соответствующее значение целевой функции – 0,746. Учитывая, что каскадная система питания предполагает многократный обмен энергией между маховиками, добиться КПД, близкого к 1, не представляется возможным. Полученный КПД является хорошим показателем. Однако из табл. 3 следует, что неиспользовано 81,95 кВт·ч энергии, что составляет почти трёхкратное значение располагаемой ёмкости накопителя.

Выполним автоматизированный расчёт для ненулевых начальных условий, в качестве которых используем результаты первого решения с нулевым приближением. Результаты решения с ненулевыми начальными условиями представлены в табл. 3 и 4. Дальнейшее использование инструмента поиска решения не приводит к изменению результата. Оптимизация распределения количества накопителей по ступеням и времени работы ступеней выполнена, так как КПД вырос до 75,3 %. Однако величина неиспользованной энергии также выросла до 86,45 кВт·ч.

Таблица 1. Количество накопителей каскадной системы питания и время работы каждой ступени для времени автономной работы 2 часа при нулевых начальных условиях для 4 ступеней

Table 1. The number of cascade supply system energy storages and the operating time of each stage for an autonomous operation time of 2 hours under zero initial conditions for 4 stages

Ступень	Δt , час	$n_{МНЭ}$, шт	$n_{под}$, шт	P_p , кВт	$P_{p,доп}$, кВт
1 ступень	0,27088	4	14	248,808	367,088
2 ступень	0,58	5	9	242,808	254,161
3 ступень	0,58	5	4	227,808	254,161
4 ступень	0,5691	4	0	206,808	206,808

Таблица 2. Затраченная и располагаемая энергия каскадной системы питания для времени автономной работы 2 часа при нулевых начальных условиях для 4 ступеней

Table 2. Expended and available energy of the cascade power supply system for an autonomous operation time of 2 hours under zero initial conditions for 4 stages

Ступень	W_p , кВт·ч	$W_{p,полн}$, кВт·ч	$\Delta W_{нерац}$, кВт·ч	$W_{исп}$, о.е.
1 ступень	67,3965	120	52,60	0,562
2 ступень	140,828	150	9,17	0,939
3 ступень	132,128	150	17,87	0,881
4 ступень	117,699	120	2,30	0,981
Суммарное значение	458,052	540	81,95	0,848

Таблица 3. Количество накопителей каскадной системы питания и время работы каждой ступени для времени автономной работы 2 часа при ненулевых начальных условиях для 4 ступеней

Table 3. The number of cascade supply system energy storages and the operating time of each stage for an autonomous operation time of 2 hours under non-zero initial conditions for 4 stages

Ступень	Δt , час	$n_{\text{МНЭ}}$, шт	$n_{\text{под}}$, шт	P_p , кВт	$P_{p,\text{доп}}$, кВт
1 ступень	0,3994	6	12	260,808	412,689
2 ступень	0,4988	4	8	230,808	230,808
3 ступень	0,5327	4	4	218,808	218,808
4 ступень	0,5691	4	0	206,808	206,808

Таблица 4. Затраченная и располагаемая энергия каскадной системы питания для времени автономной работы 2 часа при ненулевых начальных условиях для 4 ступеней

Table 4. Expended and available energy of the cascade power supply system for an autonomous operation time of 2 hours under non-zero initial conditions for 4 stages

Ступень	W_p , кВт·ч	$W_{p,\text{полн}}$, кВт·ч	$\Delta W_{\text{нерац}}$, кВт·ч	$W_{\text{исп}}$, о.е.
1 ступень	104,156	180	75,84	0,579
2 ступень	115,134	120	4,87	0,959
3 ступень	116,556	120	3,44	0,971
4 ступень	117,699	120	2,30	0,980
Суммарное значение	453,545	540	86,46	0,839

Из полученных двух вариантов выбор оптимального зависит от множества факторов, например, точки зрения специалиста-проектировщика, предпочтений заказчика, простоты и возможности реализации. Выбор первого варианта можно обосновать меньшей величиной недоиспользованной энергии, а второго – большим КПД. Однако представленные варианты по данным характеристикам отличаются незначительно. Предпочтение можно отдать второму варианту, распределение накопителей по ступеням в котором может обеспечить более простую и удобную реализацию.

Увеличим время автономной работы до 4 часов и рассмотрим режим с расчётным запасом энергии 887,72 кВт·ч и усреднённой мощностью нагрузки 170,7 кВт. В рассматриваемом примере для данного времени работы каскадная система будет крайне невыгодной. В общем случае эффективность каскадной системы снижается при увеличении количества передачи энергии между ступенями системы, что имеет место, когда время разряда на нагрузку применяемых накопителей многократно меньше требуемого времени автономной работы. Исключение составляют случаи, когда максимальная выходная мощность одного накопителя соизмерима с мощностью нагрузки. Поэтому общими факторами снижения эффективности каскадной системы являются многократный обмен энергии между ступенями системы и величина недоиспользованной энергии. Таким образом, целесообразно рассмотреть накопитель, рассчитанный на работу в режиме разряда не менее 4 часов. Подобные накопители отличаются небольшой

доступной выходной мощностью. Рассмотрим накопитель со временем работы 4 часа, располагаемой ёмкостью 32 кВт·ч и выходной мощностью 8 кВт [2], средней мощностью саморазряда за цикл 100 Вт. Выбор данных накопителей для времени работы меньше 4 часов, в том числе для ранее рассмотренных 2 часов, ограничен величиной недоиспользованной энергии.

Так как время автономной работы не превышает гарантированного времени работы, то выбор числа накопителей будем производить по условию (1), шт.:

$$n_{\text{МНЭ}}^{\text{р}} = \frac{887,72}{32 - 4 \cdot 0,1} = 28,09,$$

следовательно, необходимо 29 накопителей по условию баланса энергии; а также по условию баланса мощности (2), шт.:

$$n_{\text{МНЭ}}^{\text{р}} = \frac{170,7 + 0,1}{8} = 21,35,$$

следовательно, из условия (2) необходимо 22 накопителя.

Принимаем наибольшее из двух значений по условиям (1) и (2), то есть 29 накопителей.

Определим располагаемый объём энергии с учётом потерь на саморазряд, кВт·ч:

$$W_{\text{МНЭ}}^{\text{расп}} = n_{\text{МНЭ}} (W_{\text{МНЭ}} - p_{\text{смп}} t_{\text{раб}}) = 29 \cdot (32 - 0,1 \cdot 4) = 916,4.$$

Недоиспользованная энергия накопителей по формуле, кВт·ч:

$$W_{\text{нерац}} = W_{\text{МНЭ}}^{\text{расп}} - W_{\text{р}} = 916,4 - 887,72 = 28,68.$$

Доля использованной энергии накопителей, о.е.:

$$W_{\text{исп}} = \frac{W_{\text{р}}}{W_{\text{МНЭ}}^{\text{расп}}} = \frac{887,72}{916,4} = 0,968.$$

Отметим, что данные накопители подключаются к сети постоянного тока. Использование подобных накопителей для времени работы 4 часа при параллельной работе всех накопителей выглядит рациональным решением с точки зрения использования энергии накопителей. Доля использованной энергии составила 0,968 от располагаемой ёмкости накопителей. Величину КПД оценивать в данном случае нецелесообразно, потому что отсутствуют данные о мощности системы собственных нужд накопителя, а также не учитываются потери в инверторе, а имеющиеся данные о величине мощности саморазряда, который составляет в среднем 100 Вт за цикл, приведут к значению КПД, близкому к единице.

Заключение

Полученные условия выбора маховичных накопителей являются необходимыми, но недостаточными. Достаточные условия можно охарактеризовать как условия проверки, количество которых будет зависеть от конкретной системы и выбранного накопителя. Такими условиями могут быть, например, согласование по частоте переменного тока, по напряжению, а в случае некомплектного электромеханического преобразователя необходимо учесть и согласование с мотором-генератором. В то же время полученные условия позволяют рассмотреть работу

МНЭ как в параллельной схеме, так и в каскадной; определить как приближённые значения, которые могут быть использованы на этапе рассмотрения выбора накопителей и при недостаточно полных данных о МНЭ, так и более точные значения. Как следует из полученных выражений, их точность зависит от того, насколько полно представлены и учтены исходные данные.

Предложенная методика выбора существующих электромаховичных накопителей энергии может способствовать их стандартизации и распространению на действующих и вновь вводимых объектах.

В рассмотренной методике для параллельной и каскадной систем мощность нагрузки была введена усреднённой величиной по объёму энергии. Такое допущение справедливо, когда величина нагрузки изменяется незначительно. Если изменяющуюся нагрузку нельзя учесть средним значением, то при параллельной работе МНЭ нужно рассматривать условия выбора на каждом интервале, где нагрузку можно считать постоянной. Для каскадной схемы продолжительность работы ступеней должна быть ограничена не только наибольшим рабочим временем разряда, но и продолжительностью работы на одном уровне мощности; величина усреднённой нагрузки в выражении (9) и сама расчётная мощность ступени должны быть рассчитаны с учётом принятых интервалов усреднения мощности нагрузки.

Список литературы / References

[1] *Beacon Power Flywheel Energy Storage Systems*: буклет [Электронный ресурс]. Beacon Power, LLC [сайт]. Режим доступа: https://beaconpower.com/wp-content/themes/beaconpower/inc/beacon_power_brochure_032514.pdf [*Beacon Power Flywheel Energy Storage Systems*: brochure [Electronic resource]. Access: https://beaconpower.com/wp-content/themes/beaconpower/inc/beacon_power_brochure_032514.pdf].

[2] *Amber Kinetics M32* [Электронный ресурс] Data sheet / Amber Kinetics, Inc [сайт]. Режим доступа: <https://amberkinetics.com/wp-content/uploads/2020/05/Amber-Kinetics-DataSheet.pdf> [*Amber Kinetics M32*: data sheet [Electronic resource]. Access: <https://amberkinetics.com/wp-content/uploads/2020/05/Amber-Kinetics-DataSheet.pdf>].

[3] СТО 56947007–29.120.40.262–2018 *Руководство по проектированию систем оперативного постоянного тока (СОПТ) ПС ЕНЭС*. Типовые проектные решения. Введ. 18.12.2018. ПАО ФСК ЕЭС, 2018. 133 с. [STO 56947007–29.120.40.262–2018. *Manual for the design of operational DC systems electrical substations of the Unified National All-Russian Power Grid*. Standard design solution, ОАО FGC UES, Dec. 18, 2018].

[4] Костин В.Н. *Оптимизационные задачи электроэнергетики*. СПб.: СЗТУ, 2003. 120 с [Kostin V.N. *Optimization problems of electric power industry*. St. Petersburg: NWTU, 2003. 120 p.].

[5] Агальцов В.П. *Математические методы в программировании*. М.: Форум, 2015. 240 с. [Agaltsov V.P. *Mathematical methods in programming*. Moscow: Forum, 2015. 240 p.].

[6] *Исследование операций в экономике*. Н.Ш. Кремер, Б.А. Путко, И.М. Тришин, М.Н. Фридман; под ред. проф. Н.Ж. Кремера. М.: ЮНИТИ, 2002. 407 с. [*Research of operations in economics*. N. S. Kremer, B. A. Putko, I. M. Trishin, M. N. Friedman; ed. by N. J. Kremer. Moscow: UNITY, 2002. 407 p.].

[7] *Экономико-математические методы и прикладные модели*. В.В. Федосеев, А.Н. Гармаш, Д.М. Дайитбегов и др.; под ред. В.В. Федосеева. М.: ЮНИТИ, 1999. 391 с. [*Economic and*

mathematical methods and applied models. V. V. Fedoseev, A. N. Garmash, D. M. Dayitbegov, etc.; ed. by V. V. Fedoseev. Moscow: UNITY, 1999. 391 p.].

[8] Шадрина Н.И., Берман Н.Д. *Решение задач оптимизации в Microsoft Excel 2010*; ред. Э.М. Вихтенко. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2016. 101 с. [Shadrina N.I., Berman N.D. *Solving optimization problems in Microsoft Excel 2010*. Ed. by E.M. Vikhtenko]. Khabarovsk: Publishing House of the Pacific State University, 2016. 101 p.].

[9] Бронов С.А. *Методы оптимизации в САПР*. Красноярск, 2011. 122 с. [Bronov S. A. *Optimization methods in CAD*. Krasnoyarsk, 2011. 122 p.]

[10] Барышев А.В. Поиск оптимальных альтернативных решений с помощью Excel в задачах целочисленного программирования. *Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ»*, 2015, 7(4); <http://naukovedenie.ru/PDF/60EVN415.pdf>. DOI: 10.15862/60EVN415 [Baryshev A. V. Finding optimal alternative solutions using Excel in integer programming problems. *Internet journal "SCIENCE"*, 2015, 7(4); <http://naukovedenie.ru/PDF/60EVN415.pdf> (free access). DOI: 10.15862/60EVN415]