

## ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.31

EDN: VEFOVA

DOI: 10.21285/1814-3520-2026-1-34-56



## Частотный пуск синхронной машины по арктангенциальному закону

М.Е. Блинников<sup>1✉</sup>, В.И. Пантелеев<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

**Резюме.** Цель – формирование закона и представление методики расчета параметров арктангенциально-частотного пуска синхронной машины с маховичным накопителем энергии. Объектом исследования является электротехнический комплекс с маховичным накопителем энергии в составе трансформаторной подстанции непромышленных потребителей. Данный комплекс состоит из маховичного накопителя, синхронной машины, преобразователя частоты и системы управления. Анализ протекающих при пуске процессов выполнен в относительных единицах в dq-координатах. Для описания начального этапа пуска изменение частоты и напряжения представлены линейной, изменение электромагнитного момента синусоидальной, а изменение угла нагрузки квадратичной зависимостью от времени. Для проверки результатов проведено имитационное моделирование в среде SimInTech на основании системы дифференциальных уравнений Парка–Горева для синхронной машины. Представлено краткое описание и предложена методика расчета параметров закона частотного пуска с изменением частоты по арктангенциальной зависимости для синхронной машины с маховичным накопителем энергии. Эту зависимость можно характеризовать параметром  $\sigma$ , определяющим максимум ускорения, и продолжительностью пуска  $T_{п}$ . Показано, что ускорение ротора и потребляемый ток достигают наибольших значений к середине продолжительности пускового режима. Сравнение результатов расчета параметров частотного пуска для синхронной машины с маховичным накопителем и имитационного моделирования показало наибольшее отклонение параметров до 13%. Предложенный закон управления частотного пуска и методика расчета его параметров для синхронной машины с маховичным накопителем энергии позволяют обеспечить регулируемый пуск с заданным пиковым значением пускового тока и расчетной продолжительностью пуска. Результаты работы могут способствовать стандартизации и распространению маховичных накопителей энергии на действующих и вновь вводимых объектах.

**Ключевые слова:** маховичный накопитель энергии, обратимый преобразователь энергии, частотный пуск, арктангенциальный закон управления, синхронная машина, втягивание в синхронизм, распределенная энергетика

**Для цитирования:** Блинников М.Е., Пантелеев В.И. Частотный пуск синхронной машины по арктангенциальному закону // iPolytech Journal. 2026. Т. 30. № 1. С. 47–56. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-1-47-56>. EDN: VEFOVA.

## POWER ENGINEERING

Original article

## Frequency-controlled start of a synchronous machine based on an arctangent law

Mikhail E. Blinnikov<sup>1✉</sup>, Vasiliy I. Panteleev<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**Abstract.** This study presents a control law and the methodology for calculating the parameters of a frequency-controlled start using an arctangent-based approach for a synchronous machine equipped with a flywheel energy storage system. The electrical engineering system incorporating a flywheel energy storage unit within a transformer substation serving non-industrial consumers was examined. This system consists of a flywheel energy storage unit, a synchronous machine, a frequency converter, and a control system. The startup processes were analyzed in per-unit values using dq coordinates. The initial startup stage was described using a linear function for frequency and voltage, a sinusoidal function for electromagnetic torque, and a quadratic time dependence for load angle. The results were validated by simulation modeling in the SimInTech environment, which is based on the Park–Gorev system of differential equations for a synchronous machine. A methodology is proposed for calculating the parameters

of a frequency-controlled start law with arctangent frequency variation for a synchronous machine with a flywheel energy storage system. The proposed law is defined by a parameter  $\sigma$  that determines the maximum acceleration and start duration  $T_s$ . The results show that rotor acceleration and current consumption reach their maximum values near the midpoint of the startup interval. A comparison between the calculated frequency-start parameters for the synchronous machine with flywheel energy storage and the simulation results revealed a maximum parameter deviation of up to 13%. The proposed frequency-start control law and the associated methodology for calculating its parameters enable a controlled start with a specified peak starting current and a predetermined start duration. These results support the standardization and wider adoption of flywheel energy storage systems in both existing and newly commissioned facilities.

**Keywords:** flywheel energy storage, reversible energy converter, underfrequency relay, arctangent varying frequency law, synchronous machine, pulling into synchronism, distributed power generation

**For citation:** Blinnikov M.E., Panteleev V.I. Frequency-controlled start of a synchronous machine based on an arctangent law. *iPolytech Journal*. 2026;30(1):47-56. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-1-47-56>. EDN: VEFOVA.

## ВВЕДЕНИЕ

Исследование накопителей энергии является актуальной темой научного поиска [1–12]. Основной отраслью применения накопителей энергии является электроэнергетика [4–7, 12–16]. Большой потенциал для применения накопителей энергии имеют непромышленные потребители. Их среднее годовое потребление составляет около 25%, при этом суточное потребление отличается значительной неравномерностью [17, 18], что приводит к росту потерь мощности в энергосистеме и обуславливает снижение коэффициента использования установленной мощности электростанций [10, 13]. Альтернативой выделения резервов мощности на электростанциях и подстанциях является применение накопителей энергии [10, 13, 15].

Накопители энергии являются основой для построения современной концепции интеллектуальной сети, в которую входят как в состав распределенной генерации на базе нетрадиционных возобновляемых источников энергии, так и являются самостоятельными многозадачными энергоресурсами, например, для регулирования частоты или управления спросом [3–9, 19–23]. Для распределенной энергетики на сегодняшний день основными являются электрохимические накопители [5, 8–11]. Однако востребован поиск альтернативных решений [18, 23].

Одним из решений может стать маховичный накопитель энергии, запасующий механическую энергию вращающихся масс [9–14]. Преимуществами маховичных накопителей энергии являются быстродействие, способность развивать большие мощности, длительный срок службы, широкий диапазон рабочих температур, экологичность, теорети-

ческий неограниченный предел накопления энергии [18–21].

## ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разновидностью электротехнического комплекса с маховичным накопителем энергии является обратимый преобразователь энергии (ОПЭ), состоящий из маховичного накопителя, синхронной машины и преобразователя частоты [24]. При подключении ОПЭ к шинам низшего напряжения трансформаторных подстанций (ТП) жилых и общественных зданий комплекс может использоваться для выравнивания суточного потребления ТП, компенсации реактивной мощности, симметрирования потребления по фазам, стабилизации напряжения и увеличения регулирующего эффекта нагрузки по частоте, тем самым решая задачи стабилизации частоты и снижения потерь мощности в сети.

Основными режимами работы ОПЭ являются пусковой режим синхронной машины, режимы заряда и разряда накопительного комплекса. Основными требованиями к пусковому режиму являются ограничение максимального пускового тока и надежный пуск машины без значительных толчков и биений ротора при разгоне [25, 26]. Для регулируемого пускового режима можно применить частотный пуск. В данной работе рассматривается закон частотного пуска с пропорциональным изменением частоты и напряжения по арктангенциальной зависимости.

Цель работы – формирование закона и представление методики расчета параметров арктангенциального частотного пуска синхронной машины с маховичным накопителем энергии.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ протекающих при пуске процессов выполнен в относительных единицах в dq-координатах. Пуск синхронной машины должен осуществляться от нулевых значений скорости и напряжения до номинальных, или от 0 до 1 в относительных единицах. Арктангенс – нечетная функция с областью определения  $D \in (-\infty; +\infty)$  и областью значений  $E \in [-1; 1]$ . Чтобы закон изменения частоты в относительных единицах имел требуемые  $D \in [0; T_{\Pi}]$  и  $E \in [0; 1]$ , необходимо представить частоту  $\nu$  и амплитуду напряжения  $\alpha$  для частотного пуска по арктангенциальной зависимости следующим выражением:

$$\nu = \alpha = \frac{\arctg\left(\frac{2\chi t}{T_{\Pi}} - \chi\right) + \arctg(\chi)}{2\arctg(\chi)}, \quad (1)$$

где  $T_{\Pi}$  – время пуска, с;  $\chi$  – параметр, характеризующий область определения арктангенса;  $t$  – время, с.

Производная функции (1) имеет максимум в момент времени, равный половине продолжительности пуска, которому соответствует наибольшее ускорение ротора. Частота и напряжение в относительных единицах на середине продолжительности пуска являются постоянными и независимыми величинами, равными 0,5. Зависимость динамического момента синхронной машины от параметра  $\chi$  можно представить аппроксимированной прямой:

$$M - M_c = M_{\text{дин}} = T_j k = \frac{T_j}{T_{\Pi}} \times \times \frac{\chi}{\arctg(\chi)} \approx \frac{T_j}{T_{\Pi}} (k_{\text{cp}} \chi + b_{\text{cp}}), \quad (2)$$

где  $T_j$  – эквивалентная механическая постоянная времени ротора и механизма, с;  $M$  – электромагнитный момент;  $M_c$  – момент нагрузки на валу;  $k_{\text{cp}} = 0,63$ ,  $b_{\text{cp}} = 0,47$  – усредненные коэффициенты линейной аппроксимации.

Ток, обусловленный электромагнитной мощностью, в относительных единицах численно равен электромагнитному моменту:

$$I = M = T_j \frac{\sigma}{\arctg(\chi)} + M_c, \quad (3)$$

где параметр  $\sigma$  определяется следующим выражением:

$$\sigma = \frac{\chi}{T_{\Pi}}. \quad (4)$$

Поскольку  $b_{\text{cp}} < 1$ ,  $\chi > 1$ , получается, что  $b_{\text{cp}} \ll \chi$  и  $b_{\text{cp}} \ll T_{\Pi}$ . Тогда для пикового тока можно однозначно определить параметр  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{I - M_c}{T_j k_{\text{cp}}}. \quad (5)$$

Выражение (5) имеет смысл при значении тока больше статического момента, который для маховичных накопителей составляет несколько процентов от номинального момента синхронной машины и обусловлен, в первую очередь, трением в ее подшипниках. Для маховика предпочтительным является магнитный или электромагнитный подвес в вакуумированном корпусе. При больших скоростях подшипники синхронной машины также должны быть магнитного или электромагнитного исполнения [19, 22].

Для определения параметров  $\chi$  и  $T_{\Pi}$  рассмотрим начало пускового режима. Моменту времени  $t_1$ , при котором электромагнитный момент достигает статического момента нагрузки  $M(t_1) = M_c$ , соответствует скорость ротора  $\omega = 0$ . Моменту времени  $t_2$  соответствует пиковый угол нагрузки  $\theta_2$  и скорость ротора  $\omega = \nu$ . Примем следующие допущения. Арктангенциальный закон управления на начальном этапе представим прямой вида:

$$\nu = \alpha \approx \lambda t = \frac{3\sigma}{4\chi^2} t. \quad (6)$$

Будем считать, что электромагнитный момент от  $t = 0$  до  $t = t_2$  изменяется по синусоидальному закону:  $M = f(\sin(t))$ . За время от  $t = 0$  до  $t = t_2$  замещающая момент синусоида пройдет половину периода. Пиковое значение электромагнитного момента достигается к моменту времени  $t = t_2$ .

Тогда связь углового коэффициента аппроксимированной прямой и электромагнитного момента в начале пуска:

$$\lambda = \frac{M_{\text{ср}}}{2T_j} = \frac{M_{\text{max}} - M_c}{T_j \pi}. \quad (7)$$

Продолжительность пуска  $T_{\text{п}}$  определяется выражением:

$$T_{\text{п}} = \frac{\chi}{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{4\sigma\lambda}}. \quad (8)$$

Однако выражение (7) описывает процессы в рамках принятой математической модели, в которой была сделана замена сложных зависимостей стандартными функциями. При проверке выражения (7) на имитационной модели для различных синхронных машин оказалось, что оно не всегда обеспечивает максимальный момент  $M_{\text{max}}$ , поскольку не учитывает активное сопротивление обмотки якоря. Для уточнения необходимо определить отношение расчетного момента  $M(t_2)$  и заданного  $M_{\text{max.зад}}$  и скорректировать угловой коэффициент:

$$k_{M_3} = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{max.зад}}} = \frac{M(t_2)}{M_{\text{max.зад}}}; \quad (9)$$

$$\lambda_{\text{уточн}} = \frac{\lambda}{k_{M_3}^2}. \quad (10)$$

Для расчета электромагнитного момента в начале пуска использованы упрощенные выражения при неподвижном и вращающемся роторе соответственно:

$$\begin{aligned} M &\approx \Psi_d i_q = (x_d i_d + E) i_q = x_d i_d i_q + E i_q = \\ &= -\frac{\lambda^2 t^2 \sin \theta \cos \theta}{r_1^2} x_d + E i_q; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} M &= \Psi_d i_q - \Psi_q i_d = (x_d i_d + E) i_q - x_q i_q i_d = \\ &= -\frac{\lambda^2 t^2 \sin \theta \cos \theta}{r_1^2} (x_d - x_q) + E i_q; \end{aligned} \quad (12)$$

$$E i_q \approx \frac{x_{af} u_f}{r_f} \left( 1 - e^{-\frac{r_f \omega_6 t}{x_f}} \right) \frac{\lambda t \cos \theta}{r_1}. \quad (13)$$

Угол нагрузки при неподвижном роторе определяется выражением:

$$\theta = \omega_6 \lambda \frac{t^2}{2}. \quad (14)$$

Когда электромагнитный момент превысит статический момент нагрузки, ротор начнет вращение. Изменение угла нагрузки определяется по скольжению между скоростью ротора и поля. Рассматривая на каждом шаге вычисления малые отрезки времени, значения угла нагрузки и скорости ротора связаны с соответствующими значениями на предыдущем шаге выражениями:

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \omega_6 (\lambda t_i - \omega_{i-1}) (t_i - t_{i-1}); \quad (15)$$

$$\omega_i = \omega_{i-1} + \frac{M_i - M_c}{T_j} (t_i - t_{i-1}). \quad (16)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сформулируем методику расчета параметров арктангенциального частотного пуска:

1. Определить наибольший допустимый ток синхронной машины в пусковом режиме и рассчитать параметр  $\sigma$  по выражению (5).

2. Задать максимальный момент  $M_{\text{max}}$  с кратностью относительно номинального момента  $M_{\text{ном}}$  около 0,075–0,10, при этом заданный момент должен быть больше статического момента нагрузки.

3. Вычислить предварительное значение углового коэффициента аппроксимированной прямой закона изменения частоты  $\lambda$  по выражению (7).

4. Построить зависимости  $\theta = f(t)$  по выражению (14) и  $M = f(t)$  по выражению (11).

5. Определить время  $t_1$ , при котором электромагнитный момент достигает статического момента нагрузки  $M(t_1) = M_c$ .

6. После времени  $t_1$  угол нагрузки надо рассчитывать по выражению (15), скорость ротора – по выражению (16), а электромагнитный момент – по выражению (12) на каждом шаге вычисления. При этом расчет электромагнитного момента и угла нагрузки следует выполнять с использованием значений, полученных с предыдущего шага вы-

числения. Определить время  $t_2$ , при котором скорость ротора становится равной скорости поля  $\lambda t_2 = \omega(t_2)$ . Определить пиковый момент  $M_{\max} \approx M(t_2)$ .

7. Определить коэффициент заданного момента  $k_{M3}$  по выражению (9) и уточнить угловой коэффициент  $\lambda$  по выражению (10).

8. Рассчитать продолжительность пуска с учетом уточненного углового коэффициента  $\lambda_{\text{уточн}}$  по выражению (8).

9. Задать закон частотного пуска по арктангенциальной зависимости согласно выражению (1).

Рассмотрим пример применения методики расчета параметров закона арктангенциального частотного пуска для ТП 400 кВ·А и ОПЭ с синхронным генератором МС500-1000, статический момент нагрузки – 0,02 о.е., инерционная постоянная ротора и маховика – 3,594 с. Примем для трансформатора коэффициент аварийной

перегрузки 1,45 и коэффициент загрузки 0,95. Тогда максимальный пусковой ток трансформатора, о.е.:

$$I_{\text{п.мах}} \leq \frac{(k_{\text{а.п}} - k_3) S_{\text{ном.т}}}{P_6} = \frac{(1,45 - 0,95) 400}{500} = 0,4, \quad (17)$$

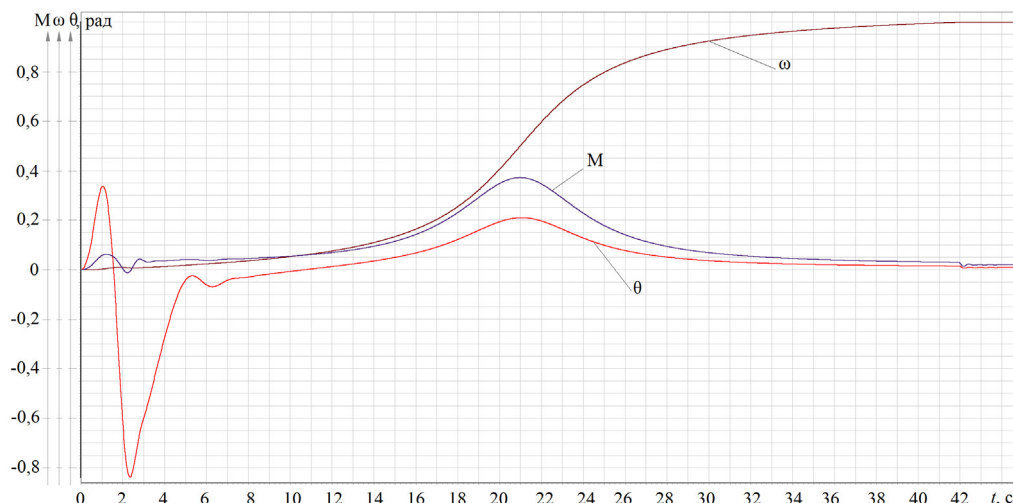
где  $S_{\text{ном.т}}$  – номинальная мощность трансформатора ТП, кВ·А;  $k_{\text{а.п}}$  – коэффициент допустимой аварийной перегрузки, о.е.;  $k_3$  – коэффициент загрузки трансформатора, о.е.;  $P_6$  – базисная мощность, кВт.

Результаты расчета параметров частотного пуска сведем в таблицу. Дополнительно в среде SimInTech проведем по полученным данным имитационное моделирование частотного пуска синхронного двигателя с маховиком. Результаты моделирования приведены в таблице и на рис. 1–4.

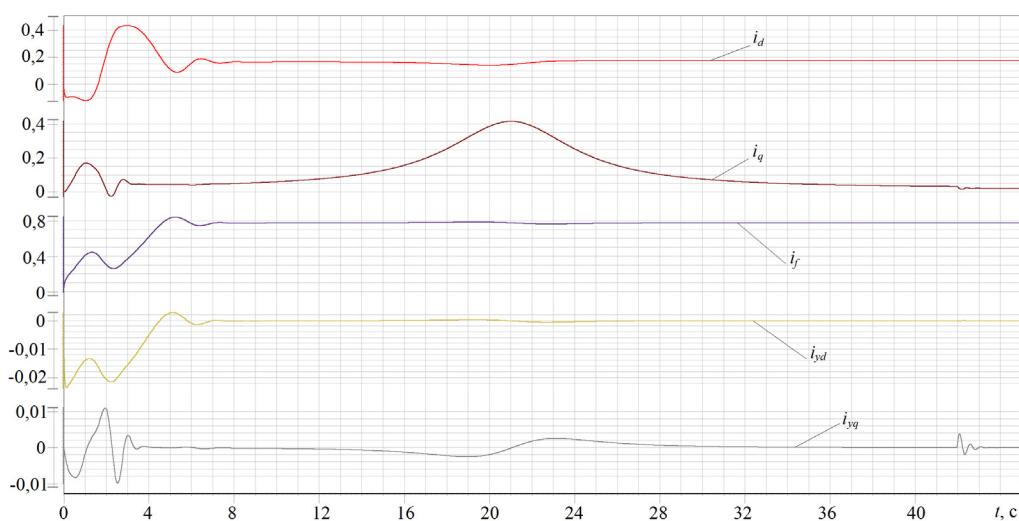
Сравнение результатов расчета и имитационного моделирования закона арктангенциального частотного пуска

Comparison of calculation results and simulation modeling of an arctangent varying underfrequency relay

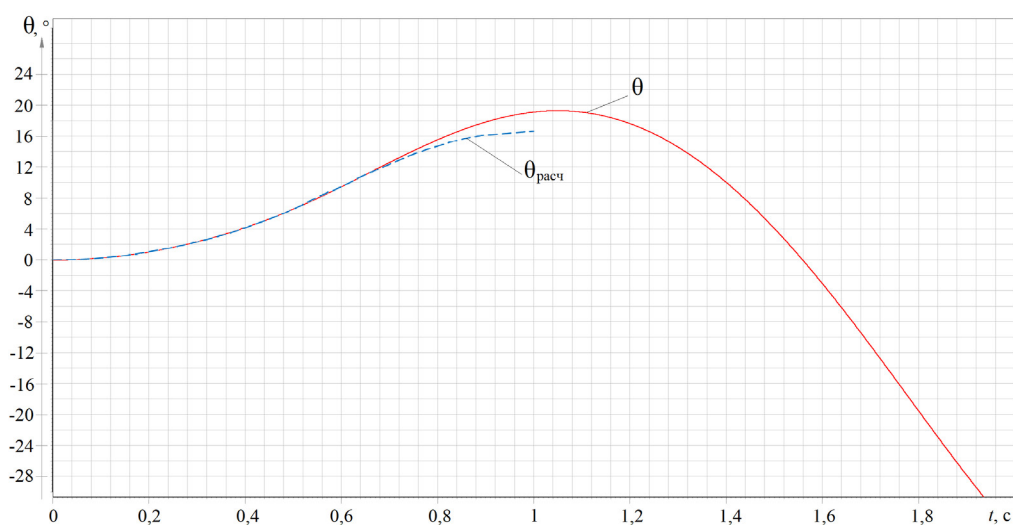
Параметр	Расчетные параметры	Имитационное моделирование
Угол нагрузки $\theta$ , °	10,758	12,076
Продольная составляющая тока $i_d$ , о.е.	0,1614	0,1483
Поперечная составляющая тока $i_d$ , о.е.	0,3660	0,4172
Полный ток $I\left(\frac{T_{\Pi}}{2}\right)$ , о.е.	0,4	0,44277
Момент $M\left(\frac{T_{\Pi}}{2}\right)$ , о.е.	0,3295	0,3723
Параметр $\sigma$ , о.е.	0,13664	
Заданный момент $M_{\text{мах.зад}}$ , о.е.	0,065	
Уточненный момент $M(t_2)$ , о.е.	0,06557	0,0626
Отклонение заданного момента $\delta M_{\text{мах.зад}}$ , %	0,88	3,70
Отклонение расчетного момента от смоделированного $\delta M_{\text{мах}}$ , %	4,74	-
Параметр $\lambda_{\text{уточн}}$ , о.е.	0,0032112	
Параметр $\chi$ , о.е.	5,73902	
Параметр $T_{\Pi}$ , о.е.	42,00265	
Время $t_1$ , с	0,4611	0,5267
Время $t_2$ , с	0,92811	1,05056



**Рис. 1.** Осциллограммы скорости ротора, электромагнитного момента и угла нагрузки в течение пуска  
**Fig. 1.** Oscillograms of rotor speed, electromagnetic torque and torque angle during starting mode



**Рис. 2.** Осциллограммы токов синхронной машины в течение пуска в относительных единицах  
**Fig. 2.** Oscillograms of synchronous machine currents in relative units during starting mode



**Рис. 3.** Осциллограмма угла нагрузки и расчетное значение в начале пуска  
**Fig. 3.** Oscillogram of the torque angle and calculated torque angle at the beginning of the starting mode



Рис. 4. Осциллограмма электромагнитного момента и расчетное значение в начале пуска

Fig. 4. Oscillogram of the simulated electromagnetic torque and calculated electromagnetic torque at the beginning of the starting mode

После втягивания в синхронизм кривая скорости идет по арктангенциальному закону, а кривая момента – по производной этого закона (см. рис. 1). Ток  $i_q$  практически повторяет закон изменения производной частоты или электромагнитного момента.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлено краткое описание и предложена методика расчета параметров закона частотного пуска с изменением частоты по арктангенциальной зависимости для синхронной машины с маховичным накопите-

лем энергии. Эту зависимость можно характеризовать параметром  $\sigma$ , определяющим максимум ускорения, и продолжительностью пуска  $T_{\Pi}$ .

Ускорение ротора и потребляемый ток достигают наибольших значений к середине продолжительности пускового режима.

По предложенной методике рассчитаны параметры частотного пуска для синхронной машины с маховичным накопителем и выполнено их сравнение с результатами имитационного моделирования. Сравнение результатов показало, что различия не превышают 13%.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Доброго К.В. К вопросу создания гибридных систем накопления электроэнергии // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2023. Т. 66. № 3. С. 215–232. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-215-232>. EDN: AVOTEY.
2. Токарев И.С., Толмачев В.Н., Кирюхин С.Н., Иваницкий С.С., Пудкова Т.В. Расчет показателей надежности системы электроснабжения с интегрированной системой накопления энергии // Электронный сетевой политематический журнал // Научные труды Кубанского государственного технологического университета. 2024. № 3. С. 116–130. <https://doi.org/10.26297/2312-9409.2024.3.12>. EDN: VMBGOM.
3. Косарев Б.А., Кошук Г.А., Лазарев Д.В., Охотников А.А., Хамитов Р.Н. Способы поддержания значений напряжения и частоты в допустимых пределах в условиях распределенной генерации при резкопеременном характере нагрузки потребителя // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. Т. 19. № 3. С. 64–73. <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-64-73>. EDN: NZWJYZ.
4. Khaleel M., Yusupov Z., Kilic H., Moftah A., Hesri A., Ahmed A.A., et al. Battery technologies in electrical power systems: pioneering secure energy transitions // Journal of Power Sources. 2025. Vol. 653. P. 237709. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.237709>. EDN: MFQXJO.
5. Lee Dasheng, Chiang Yachi, Chen Yen-Tang, Tsai Hsin-Han. Impacts of battery energy storage system on power grid smartness: case study of Taiwan power company // Journal of Energy Storage. 2024. Vol. 86. Part A. P. 111188. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111188>. EDN: FODGAF.
6. Song Zhuoran, Zhang Mingli, Chi Yuanying, Li Jialin, Zheng Yi. Research on the coordinated optimization of energy storage and renewable energy in off-grid microgrids under new electric power systems // Global Energy Interconnection. 2025. Vol. 8. Iss. 2. P. 213–224. <https://doi.org/10.1016/j.gloei.2024.12.004>. EDN: SVCHQA.

7. Ajami O.M.T., Tan R.H.G., Nadarajah M., Jamaludin F.A., Pradana A.B. Tribrid energy storage system for frequency support with stage-specific control in a complex interconnected power system with HVDC link // *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 2025. Vol. 13. P. 101100. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2025.101100>. EDN: HPHGSE.
8. Jaradat T., Khatib T. A review of battery energy storage system for renewable energy penetration in electrical power system: environmental impact, sizing methods, market features, and policy frameworks // *Future Batteries*. 2025. Vol. 7. P. 100106. <https://doi.org/10.1016/j.fub.2025.100106>. EDN: ZQMIFL.
9. Гарифулина Н.А. Современные технологии хранения электроэнергии для энергосистем будущего // *Экономика и управление: проблемы, решения*. 2024. Т. 9. № 9. С. 95–101. <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2024.09.09.013>. EDN: GXZUIR.
10. Владимиров Л.В. Накопители электрической энергии в системах децентрализованного электроснабжения // *Вестник Югорского государственного университета*. 2024. Т. 20. № 4. С. 31–35. <https://doi.org/10.18822/byusu20240431-35>. EDN: AIESCV.
11. Жилин Е.В., Долгаль С.В., Малышева А.Д. Перспективы применения накопителей электроэнергии в энергетических системах // *Энергетические системы*. 2023. № 3. С. 32–41. <https://doi.org/10.34031/es.2023.3.004>. EDN: RKAXAO.
12. Song Gengling, Wu Zhenkui, Yan Qianlong, Zhang Jihong, Yang Peihong, Zhang Zilei. Sensorless fault-tolerant control strategy of flywheel energy storage system based on improved model reference adaptive system // *Journal of Energy Storage*. 2025. Vol. 132. Part B. P. 117842. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.117842>. EDN: KAJIQH.
13. Li Yueming, Ding Zemin, Yu Youhong, Liu Yongbao. Mitigation effect of flywheel energy storage on the performance of marine gas turbine DC microgrid under high-power load mutation // *Energy Reports*. 2023. Vol. 9. P. 1380–1396. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.12.052>. EDN: ERRGOG.
14. Meng Keqilao, Wu Huijuan, Fan Daoerji, Zhou Zhigang, Zhang Zhanqiang, Liu Qing. Research on the strategy for average consensus control of flywheel energy storage array system based on lifecycle // *Journal of Energy Storage*. 2024. Vol. 99. Part B. P. 113409. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113409>. EDN: XNNDLS.
15. Cruz-De-Jesús E., Martínez-Ramos J.L., Marano-Marcolini A., Gómez-Expósito A. Economic assessment of battery energy storage systems for frequency regulation reserve provision: a case study of the Dominican Republic // *Energy for Sustainable Development*. 2025. Vol. 88. P. 101749. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2025.101749>. EDN: IOGPJS.
16. Talebpour N., Ilbeigi M. Modeling and forecasting uncertainties in power exchange between distributed energy systems and urban grid networks // *Energy Reports*. 2025. Vol. 14. P. 3277–3285. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.10.008>. EDN: WLZEZW.
17. Блинников М.Е., Пантелеев В.И. Компенсация несимметричной нагрузки в четырёхпроводных сетях с помощью активного выпрямителя с источником энергии // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. 2024. Т. 17. № 5. С. 655–666. EDN: IWUUZD.
18. Третьяков Е.А., Мещеряков А.В. Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения с резервированием от дизель-генераторных установок // *Вестник Югорского государственного университета*. 2023. Т. 19. № 2. С. 133–143. <https://doi.org/10.18822/byusu202302133-143>. EDN: SVZTKU.
19. Ойдинская С.В. Применение маховичных аккумуляторов в ветровой отрасли электроэнергетики // *Политехнический молодежный журнал*. 2025. № 1. С. 1–10. <https://doi.org/10.18698/2541-8009>. EDN: AFDXIS.
20. Мотова М.В. Анализ накопителей электрической энергии для применения в интеллектуальных энергосистемах // *Вестник НИЦ Военной академии Ракетных войск стратегического назначения*. 2024. № 7. С. 28–34. EDN: BUTWLZ.
21. Casarin S., Cavazzini G., Pérez-Díaz J.I. Battery and flywheel hybridization of a reversible pumped-storage hydro power plant for wear and tear reduction // *Journal of Energy Storage*. 2023. Vol. 71. P. 108059. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108059>. EDN: MCHLZQ.
22. Duan Jiandong, Ni He, Tao Jiaxin, Li Zhifan, Zhang Yu, Wang Jianhua. Adaptive primary frequency regulation method based on energy perspective for integrated unit-level wind storage systems // *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2025. Vol. 169. P. 110822. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110822>. EDN: GNJDQZ.
23. Pelosi D., Baldinelli A., Cinti G., Ciupageanu D.-A., Ottaviano A., Santori F., et al. Battery-hydrogen vs. flywheel-battery hybrid storage systems for renewable energy integration in mini-grid: a techno-economic comparison // *Journal of Energy Storage*. 2023. Vol. 63. P. 106968. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106968>. EDN: BQRYGM.
24. Блинников М.Е., Пантелеев В.И. Обратимый преобразователь энергии с маховичным накопителем в системах электроснабжения // *Энергетические системы*. 2023. Т. 8. № 2. С. 44–50. <https://doi.org/10.34031/es.2023.2.005>. EDN: WQAHDA.
25. Гильманов Э.А. Способы и современные устройства плавного пуска высоковольтных двигателей // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2023. Т. 19. № 1. С. 93–105. <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-93-105>. EDN: VTICOB.
26. Касымов К.Ж., Жакишев Б.А., Килибаев Е.О. К вопросу плавного пуска высоковольтных электродвигателей // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2024. № 9-2. С. 110–114. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-9-2-110-114>. EDN: MGGBGP.

### References

1. Dobrego K.V. On the problem of arrangement of hybrid energy storage systems. *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2023;66(3):215-232. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-215-232>.
2. Tokarev I.S., Tolmachev V.N., Kirukhin S.N., Ivanitskij S.S., Pudkova T.V. Calculation of reliability parameters of power supply systems with integrated electrical energy storage systems. *Scientific Works of the Kuban State Technological University*. 2024;3:116-130. (In Russ.). <https://doi.org/10.26297/2312-9409.2024.3.12>. EDN: VMBGOM.
3. Kosarev B.A., Koshchuk G.A., Lazarev D.V., Okhotnikov A.A., Khamitov R.N. Maintaining voltage and frequency values within acceptable limits in conditions of distributed generation with a sharply variable nature of the load of the consumer. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*. 2023;19(3):64-73. (In Russ.). <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-64-73>. EDN: NZWJYZ.
4. Khaleel M., Yusupov Z., Kilic H., Moftah A., Hesri A., Ahmed A.A., et al. Battery technologies in electrical power systems: pioneering secure energy transitions. *Journal of Power Sources*. 2025;653:237709. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.237709>. EDN: MFQXJO.
5. Lee Dasheng, Chiang Yachi, Chen Yen-Tang, Tsai Hsin-Han. Impacts of battery energy storage system on power grid smartness: case study of Taiwan power company. *Journal of Energy Storage*. 2024;86(A):111188. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111188>. EDN: FODGAF.
6. Song Zhuoran, Zhang Mingli, Chi Yuanying, Li Jialin, Zheng Yi. Research on the coordinated optimization of energy storage and renewable energy in off-grid microgrids under new electric power systems. *Global Energy Interconnection*. 2025;8(2):213-224. <https://doi.org/10.1016/j.gloei.2024.12.004>. EDN: SVCHQA.
7. Ajami O.M.T., Tan R.H.G., Nadarajah M., Jamaludin F.A., Pradana A.B. Tribrid energy storage system for frequency support with stage-specific control in a complex interconnected power system with HVDC link. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 2025;13:101100. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2025.101100>. EDN: HPHGSE.
8. Jaradat T., Khatib T. A review of battery energy storage system for renewable energy penetration in electrical power system: environmental impact, sizing methods, market features, and policy frameworks. *Future Batteries*. 2025;7:100106. <https://doi.org/10.1016/j.fub.2025.100106>. EDN: ZQMIFL.
9. Garifullina N.A. Modern electric power storage technologies for the power systems of the future. *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya*. 2024;9(9):95-101. (In Russ.). <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2024.09.09.013>. EDN: GXZUIR.
10. Vladimirov L.V. Electric energy storage devices in decentralized power supply systems. *Yugra State University Bulletin*. 2024;20(4):31-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.18822/byusu20240431-35>. EDN: AIESCV.
11. Zhilin E.V., Dolgal S.V., Malysheva A.D. The perspectives of electric power storage devices using in energy systems. *Energy System*. 2023;3:32-41. (In Russ.). <https://doi.org/10.34031/es.2023.3.004>. EDN: RKAXAO.
12. Song Gengling, Wu Zhenkui, Yan Qianlong, Zhang Jihong, Yang Peihong, Zhang Zilei. Sensorless fault-tolerant control strategy of flywheel energy storage system based on improved model reference adaptive system. *Journal of Energy Storage*. 2025;132(B):117842. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.117842>. EDN: KAJIQH.
13. Li Yueming, Ding Zemin, Yu Youhong, Liu Yongbao. Mitigation effect of flywheel energy storage on the performance of marine gas turbine DC microgrid under high-power load mutation. *Energy Reports*. 2023;9:1380-1396. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.12.052>. EDN: ERRGOG.
14. Meng Keqilao, Wu Huijuan, Fan Daoerji, Zhou Zhigang, Zhang Zhanqiang, Liu Qing. Research on the strategy for average consensus control of flywheel energy storage array system based on lifecycle. *Journal of Energy Storage*. 2024;99(B):113409. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113409>. EDN: XNNDLS.
15. Cruz-De-Jesús E., Martínez-Ramos J.L., Marano-Marcolini A., Gómez-Expósito A. Economic assessment of battery energy storage systems for frequency regulation reserve provision: a case study of the Dominican Republic. *Energy for Sustainable Development*. 2025;88:101749. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2025.101749>. EDN: IOGPJS.
16. Talebpour N., Ilbeigi M. Modeling and forecasting uncertainties in power exchange between distributed energy systems and urban grid networks. *Energy Reports*. 2025;14:3277-3285. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.10.008>. EDN: WLZEW.
17. Blinnikov M.E., Panteleev V.I. Compensation of unsymmetrical load in four-wire networks using an active rectifier with an energy source. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. 2024;17(5):655-666. (In Russ.). EDN: IWUJZD.
18. Tretyakov E.A., Meshcheryakov A.V. Improving the quality of electricity in power supply systems with reservation from diesel generator plants. *Yugra State University Bulletin*. 2023;19(2):133-143. (In Russ.). <https://doi.org/10.18822/byusu202302133-143>. EDN: SVZTKU.
19. Oydinskaya S.V. Introducing the flywheel batteries in the wind power industry. *Politechnical student journal*. 2025;1:1-10. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2541-8009>. EDN: AFDXIS.
20. Motova M.V. Analysis of electric energy storage devices for use in intelligent power system. *Vestnik NIC Voennoj akademii Raketnyh vojsk strategicheskogo naznacheniya*. 2024;7:28-34. (In Russ.). EDN: BUTWLZ.
21. Casarin S., Cavazzini G., Pérez-Díaz J.I. Battery and flywheel hybridization of a reversible pumped-storage hydro power plant for wear and tear reduction. *Journal of Energy Storage*. 2023;71:108059. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108059>. EDN: MCHLZQ.

22. Duan Jiandong, Ni He, Tao Jiaxin, Li Zhifan, Zhang Yu, Wang Jianhua. Adaptive primary frequency regulation method based on energy perspective for integrated unit-level wind storage systems. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2025;169:110822. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110822>. EDN: GNJDQZ.
23. Pelosi D., Baldinelli A., Cinti G., Ciupageanu D.-A., Ottaviano A., Santori F., et al. Battery-hydrogen vs. flywheel-battery hybrid storage systems for renewable energy integration in mini-grid: a techno-economic comparison. *Journal of Energy Storage*. 2023;63:106968. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106968>. EDN: BQRYGM.
24. Blinnikov M.E., Panteleev V.I. Reversible energy converter with flywheel energy storage in power supply systems. *Energy System*. 2023;8(2):44-50. (In Russ.). <https://doi.org/10.34031/es.2023.2.005>. EDN: WQAHDA.
25. Gilmanov E.A. Methods and modern devices for soft start of high voltage motors. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*. 2023;19(1):93-105. (In Russ.). <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-93-105>. EDN: VTICOB.
26. Kasymov K.Zh., Zhakishhev B.A., Kilibayev E.O. To the question of soft start of high-voltage electric motors. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2024;9-2:110-114. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-9-2-110-114>. EDN: MGGBGP.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

##### Блинников Михаил Евгеньевич,

аспирант,  
Сибирский федеральный университет,  
660074, г. Красноярск,  
ул. Академика Киренского, 26, Россия  
✉ [mikhail1997blinnikov@mail.ru](mailto:mikhail1997blinnikov@mail.ru)  
<https://orcid.org/0009-0003-3111-0165>

##### Пантелеев Василий Иванович,

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой электроэнергетики,  
Сибирский федеральный университет,  
660074, г. Красноярск,  
ул. Академика Киренского, 26, Россия  
[pvi0808@rambler.ru](mailto:pvi0808@rambler.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-8676-3177>

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### Mikhail E. Blinnikov,

Postgraduate Student,  
Siberian Federal University,  
26 Kirensky St.,  
Krasnoyarsk, 660074, Russia  
✉ [mikhail1997blinnikov@mail.ru](mailto:mikhail1997blinnikov@mail.ru)  
<https://orcid.org/0009-0003-3111-0165>.

##### Vasiliy I. Panteleev,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Head of the Electric Power Engineering Department,  
Siberian Federal University,  
26 Kirensky St., Krasnoyarsk, 660074, Russia  
[pvi0808@rambler.ru](mailto:pvi0808@rambler.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-8676-3177>.

#### Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### Конфликт интересов

Пантелеев Василий Иванович является членом редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal» с 2000 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### Информация о статье

Статья поступила в редакцию 24.11.2025 г.; одобрена после рецензирования 18.01.2026 г.; принята к публикации 30.01.2026 г.

#### Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

#### Conflict of interests

Vasiliy I. Panteleev has been a member of the iPolytech Journal Editorial Board since 2000, but he was not involved in making decision about accepting the present article for publication. The article was subjected the Journal's review procedure. The authors do not report any other conflicts of interest.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

#### Information about the article

The article was submitted 24.11.2025; approved after reviewing 18.01.2026; accepted for publication 30.01.2026.