

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

Научная статья

УДК 316.4.057.4, 621.313-57, 622-1/-9

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-3-3-12

Ещин Евгений Константинович

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

*E-mail: eke_kuzstu@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ САМОХОДНЫХ ГОРНЫХ МАШИН

Аннотация.

Рассмотрена возможность возникновения при определенных условиях т.н. «скрытых колебаний» в электромеханических системах проходческих комбайнов как самоходных горных машин, находящихся на упругом основании и получающих электрическую энергию через протяженную кабельную сеть. Обращается внимание, что по результату воздействия на механическое передаточное устройство (редуктор) и корпус комбайна режим пуска асинхронного электродвигателя (АД) электропривода исполнительного органа прямым включением в сеть эквивалентен работе двигателя постоянного тока в опыте Зоммерфельда с эксцентрично расположенным грузиком при воздействии его на фундамент двигателя, находящегося в этом опыте также на упругом основании. В рассматриваемом варианте электропривода проходческого комбайна возникающие изменения положения корпуса статора АД из-за его подвижности (упругости основания) могут повлечь за собой изменения абсолютной скорости вращения электромагнитного поля статора, что может привести к изменению мгновенных значений электромагнитного момента АД и возникновению во всей электромеханической системе электропривода колебаний, которые можно классифицировать как скрытые (*hidden oscillations*). В качестве примера рассмотрен режим пуска электропривода исполнительного органа проходческого комбайна КСП-32 в реальной системе электроснабжения. Приводятся графические результаты расчетов. Делается вывод, что в электромеханических системах самоходных горных машин при определенных условиях при пусках можно наблюдать проявление эффекта Зоммерфельда в виде возникновения низкочастотных скрытых колебаний в электромеханической системе, сопровождающихся значительными колебаниями коэффициента мощности АД и в т.ч. колебаниями активной и реактивной мощностей. Теоретическое предсказание этого явления затруднено и может быть обнаружено путем численного моделирования вариантов режимов работы цифрового двойника горной машины.



Информация о статье

Поступила:

21 марта 2023 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 июня 2023 г.

Принята к печати:

27 июня 2023 г.

Опубликована:

11 июля 2023 г.

Ключевые слова:

проходческий комбайн, асинхронный электродвигатель, электропривод, скрытые колебания, эффект Зоммерфельда

Для цитирования: Ещин Е.К. Особенности динамических процессов самоходных горных машин // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 3 (167). С. 3-12. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-3-3-12, EDN: MMHUMB

Введение.

Среди множества горных машин отдельно выделяется (ГОСТ Р 54976-2012 «Оборудование горно-шахтное. Термины и определения») «проходческий комбайн» как «...самоходная проходческая

машина ... roadheading machine» (СПМ). На необходимость учета особенностей расчетов динамических режимов работы СПМ, возникающих именно из-за «самоходности» (roadheading | self-propelled), т.е. из-за их технологической возможности изменять пространственное положение в системе 3D-

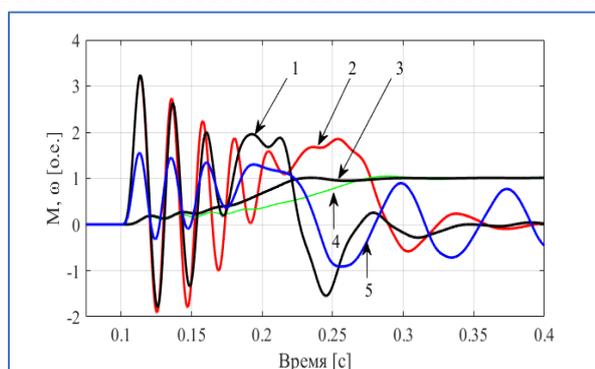


Рис. 1. Характер изменения электромагнитного момента АД (1,2,5) и его скорости (3,4) с учетом (1,3) и без учета (2,4) движений корпуса статора в режиме пуска. (5) – при питании через кабель.
 Fig. 1. The nature of the change in the electromagnetic torque of the IM (1,2,5) and its speed (3,4) taking into account (1,3) and without taking into account (2,4) the movements of the stator housing in the start mode. (5) – when powered via cable.

координат, было обращено внимание в [1]. В этой работе рассматривался режим прямого пуска электропривода исполнительного органа проходческого комбайна КСП-32 [2], когда существенное влияние на характер динамических процессов в электромеханической системе СПМ оказывают электромагнитные переходные явления, обусловленные в т.ч. движениями корпуса статора асинхронного электродвигателя (АД), находящегося на упругом основании. Как известно, режим прямого пуска электродвигателя скоротечен и обычно длится менее секунды.

Обратим внимание на Рис. 1 из [1] (в [1] обозначен как Рис. 3), а именно на линию (5), когда пуск АД происходит в реальных условиях, т.е. при питании его через кабель (через протяженную кабельную сеть системы электроснабжения). Видно, что к моменту времени 0,4 с. электромагнитные переходные процессы практически завершились, но колебания электромагнитного момента в условиях (5) продолжают. Вывод по результатам анализа Рис. 3 из [1] прост – в электромеханической системе СПМ при определенных условиях могут возникать колебания.

В соответствии с установившейся терминологией [3-6] их можно назвать самовозбуждающимися (self-excited oscillations) и скрытыми (hidden). Н.В. Кузнецовым в [3] применительно к горной тематике обращается внимание конкретно на «... выявление скрытых колебаний в динамических моделях буровых установок... где энергия от электропривода расходовалась на возбуждение крутильных колебаний бура». Скрытые колебания (hidden oscillations) с точки зрения их локализации обсуждаются в [7].

Подобная ситуация (наличие колебаний), вообще говоря, практически зафиксирована для буровых установок в [8-10] и изучена на основе синтезированных математических и электромеханических моделей этих установок, например, в [11, 12] и

других объектов, находящихся в т.ч. на упругих основаниях [13-16].

В [3] обращается внимание на особенность проявления скрытых колебаний «... Одним из ярких примеров скрытых колебаний в электромеханических системах является эффект застревания частоты вращения ротора при запуске электрической машины, установленной на упругом основании.» Последняя фраза прямо относится к знаменитому эффекту А. Зоммерфельда [17-19] – явлению, известному с 1902 г. [17] и объясняющему поведение электродвигателя во время пуска в условиях, когда его корпус находился на упругом основании, например, как КСП-32 в [2] и других случаях [14,15]. В [19] есть уточнение «...Под эффектом Зоммерфельда – Кононенко ... понимается совокупность динамических эффектов при взаимодействии любого вида возбудителя колебаний и разной природы колебательных систем...». Разная природа колебательных систем, где наблюдаются проявления эффекта Зоммерфельда, представлена, например, в [20-23].

Заметим справочно, что упомянутые выше термин (self-excited oscillations) и скрытые колебания (hidden oscillations) прямо связаны с термином «скрытый аттрактор (hidden attractors)», который (термин) появился сравнительно недавно и введен Г.А. Леоновым и Н.В. Кузнецовым в 2010 г. [24]. Эта новизна отмечена также у V.-Т. Pham в [25] «...Recently, Leonov and Kuznetsov introduced a new class of nonlinear dynamical systems, which is called systems with hidden attractors...», а также в [26]. Имеются множественные упоминания скрытых аттракторов, например, в [27,28].

В [14, 15] рассмотрены задачи о поведении синхронного [14] и асинхронного электродвигателей, также находящихся на упругих основаниях. Подобного рода задачи, как известно, относятся к т.н. внешней динамике машин, например, [29].

Структурно физические компоненты в опыте А. Зоммерфельда и проходческого комбайна совпадают. Есть источники возбуждения колебаний (электродвигатели – постоянного тока с эксцентриком на якоре в опыте Зоммерфельда и асинхронный с к.з. ротором и множественными пульсациями электромагнитного момента (эквивалент эксцентрика) при прямом пуске), есть фундаменты электродвигателей – дубовая столешница (Зоммерфельд) и корпус комбайна; есть упругие основания – еловые ножки стола (Зоммерфельд) и ходовая часть СПМ.

Электропривод исполнительного органа СПМ составляет единое целое с корпусом и при всяком пространственном изменении последнего также изменяется. Эти изменения можно оценивать угловой скоростью корпуса статора АД, которая, алгебраически суммируясь с переносной синхронной скоростью вращения электромагнитного поля статора, образует абсолютную скорость его (поля) вращения. Таким образом, пространственные изменения корпуса статора АД влекут за собой аналогичные изменения абсолютной скорости вращения электромагнитного поля статора, что, в свою оче-

редь, приводит к изменению значений электромагнитного момента АД и возникновению во всей электромеханической системе электропривода изменений, которые в случае колебательных движений можно классифицировать как *скрытые*. В итоге получается, что АД СПМ может быть *возбудителем колебаний в системе электропривода* и в ней (системе) не исключены возникновения *скрытых колебаний*.

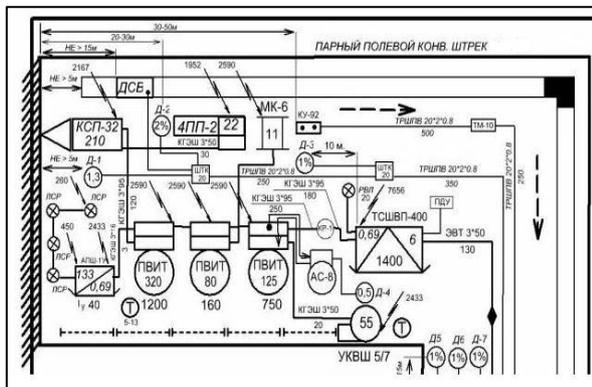


Рис. 2. Расчетная схема электроснабжения КСП-32

Fig. 2. Calculation scheme for power supply KSP-32

В этой связи целесообразно рассмотреть какую-либо реально существующую систему электропривода СПМ, которая получает питание через протяженную кабельную сеть и передает энергию через электродвигатель на исполнительный орган через редуктор, который представляет собой совокупность валов, шестерен и зубчатых колес с различными моментами инерции, жесткостями и демпфированием возможных колебаний в валах и зубчатых зацеплениях, т.е. является многомассовой колебательной системой.

Необходимость этого возникает потому, что эффект Зоммерфельда и возникающие при этом возможные скрытые колебания в СПМ не могут считаться явлениями, которые позитивно влияют на динамическое состояние электромеханических систем. Известно много негативной информации, связанной с ними, в т.ч. катастрофической [30]. Из этого следует, что определение условий возникновения или возможности существования колебаний (вибраций) в электромеханических системах самоходных горных машин актуально и значимо.

Методы. Рассмотрим режим пуска электропривода исполнительного органа проходческого комбайна КСП-32 на примере его компьютерной модели (Matlab/Simulink) в системе электроснабжения по Рис. 2. Пуск производится прямым включением АД в питающую сеть с исходной величиной питающего напряжения у ТСШВП-400 690 В. Асинхронный электродвигатель 2ЭДКОФВ250LB4 У2.5 мощностью 110 кВт (в режиме S2 - 132 кВт) с возможностью переключения Y/Δ запитывается через силовую кабель КГЭШ 3×95 длиной 370 м.

Выходной вал АД соединяется с редуктором зубчатой муфтой. Редуктор состоит из шестерен, зубчатых колес и валов, которые последовательно во времени (за период пуска) из-за конечных зна-

чений жесткостей упомянутых элементов и зазоров в соединениях поочередно «включаются» в работу, изменяя суммарный момент инерции редуктора.

Такая идеология использована в [31] при расчетах в среде Matlab/Simulink пусков комбайна КСП-32, а аналогичная в [32] при моделировании динамической нагруженности редуктора (Dynamic model of gear of electric mining shovel) в среде Matlab/Simscape электропривода экскаватора для ведения горных работ.

Кинематическая схема и параметры редуктора КСП-32 представлены в [2, 31]. Необходимость рассмотрения и включения в расчетную схему движущихся масс компонентов редуктора обусловлена необходимостью «приблизить» условия режима пуска КСП-32 к условиям пуска в опыте Зоммерфельда, где основная движущая масса – массивная дубовая столешница, на которой находился электродвигатель.

Корпус комбайна является базовой частью, на которой монтируются основные узлы и системы комбайна (исполнительный орган с АД, питатель, корпус комбайна, скребковый конвейер, перегружатель, ходовая часть). Ходовая часть состоит из гусеничных тележек, которые крепятся к корпусу комбайна, т.е. (повторяется) корпус комбайна *подвижен* и находится на *упругом* основании.

При моделировании АД обычно используется теория описания переходных процессов в электромеханических преобразователях энергии, которая ориентирована на *неподвижный* статор электродвигателя (например, в базовых источниках [33] читаем «...Stator for a machine with *stationary* field

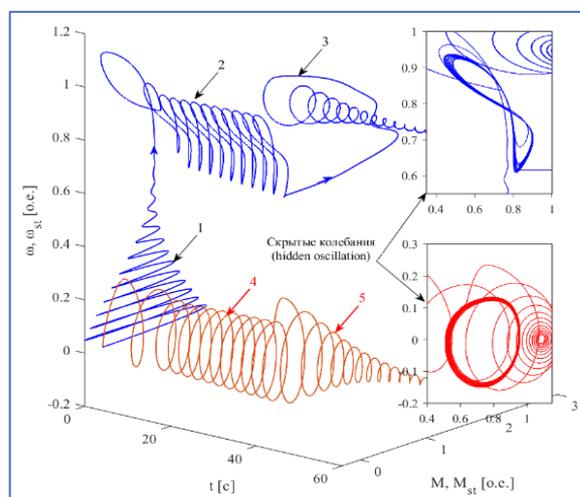


Рис. 3. 3D динамическая механическая характеристика пуска АД исполнительного органа КСП-32 (1,2,3) и движения корпуса АД (4,5) с проекциями на плоскость (M, Mst) – (ω, ωst) фрагментов траекторий скрытых колебаний (длина кабеля – 370 м.)

Fig.3. 3D dynamic mechanical characteristic of the start of the IM of the executive body KSP-32 (1,2,3) and the movement of the IM body (4,5) with projections on the plane (M, Mst) – (ω, ωst) of fragments of trajectories of hidden oscillations (cable length – 370 m.)

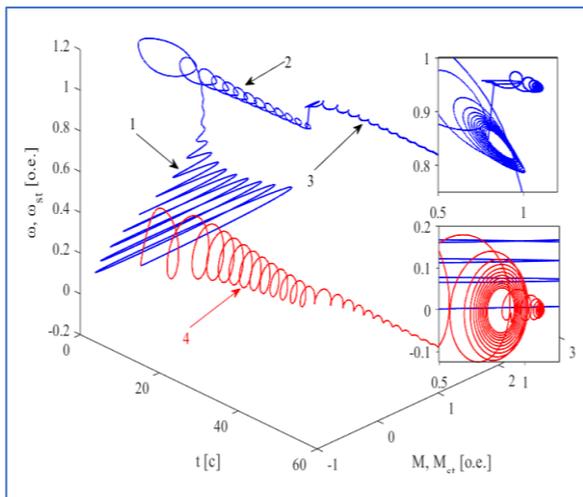


Рис. 4. 3D динамическая механическая характеристика пуска АД исполнительного органа КСП-32 (1,2,3) и движения корпуса АД (4) с проекциями фрагментов траекторий затухающих колебаний на плоскость $(M, M_{st}) - (\omega, \omega_{st})$ (длина кабеля – 18,5 м)

Fig. 4. 3D dynamic mechanical characteristic of the start of the IM of the executive body KSP-32 (1,2,3) and the movement of the IM body (4) with projections of fragments of the trajectories of damped oscillation onto the plane $(M, M_{st}) - (\omega, \omega_{st})$ (cable length – 18.5 m)

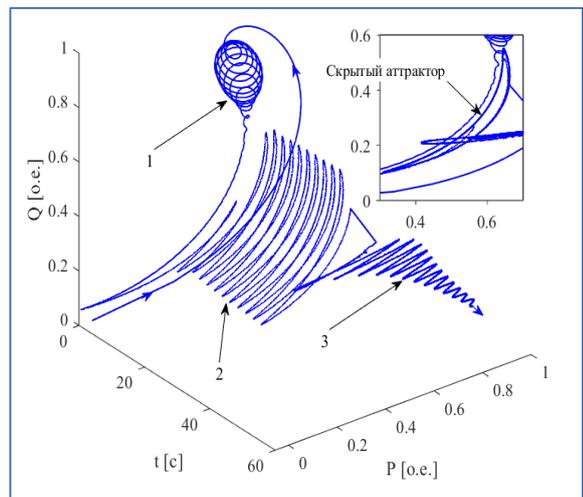


Рис. 5. Изменения АД активной (P) и реактивной (Q) мощностей в режимах пуска (1), скрытых колебаний (2), выхода из режима скрытых колебаний (3) и проекция скрытого аттрактора на плоскость PQ (длина кабеля – 370 м.)

Fig. 5. Changes in active (P) and reactive (Q) power in the modes of starting (1), hidden oscillations (2), exit from the hidden oscillation mode (3) and the projection of the hidden attractor on the plane PQ (cable length – 370 m.)

structure...», в [34] «...машина состоит из неподвижной части – статора...») и не учитывает возможных изменений электромагнитного момента АД из-за пространственных движений статора, которые влекут за собой изменение абсолютной

скорости вращения электромагнитного поля статора.

Последнее по результату влияния на мгновенное значение электромагнитного момента АД эквивалентно введению известного частотного способа управления состоянием АД (М.П. Костенко – 1925 г.) при непропорциональном частоте изменении питающего напряжения.

Понятно, что естественным путем уточнения влияния возможных изменений абсолютной скорости вращения электромагнитного поля статора АД в динамических режимах работы является определение правил формирования в математических моделях АД значений этой величины. Этот параметр должен явно присутствовать в модели АД. В результате появляется возможность уточнения расчетов электромагнитных состояний АД и механических компонентов электропривода ГМ с незакрепленным статором в динамических режимах работы.

В этой связи исходная математическая модель АД принята по [35] и с учетом в ней пространственного изменения положения статора по [1].

Модель дополнена уравнениями, определяющими механические движения ротора (основное уравнение движения электропривода) и такие же возможные движения корпуса статора АД.

Заметим, что движения корпуса статора АД определяются режимом его работы «на упор». Движения компонентов и параметры редуктора – по [1,31]. Учтены процессы в кабельной сети.

Поскольку единственным параметром, который можно физически изменять в реальных условиях пуска системы, состоящей из питающего кабеля – электродвигателя (АД) – корпуса комбайна и редуктора исполнительного органа, является длина кабеля, то расчеты естественно вести для изменяющейся длины кабеля.

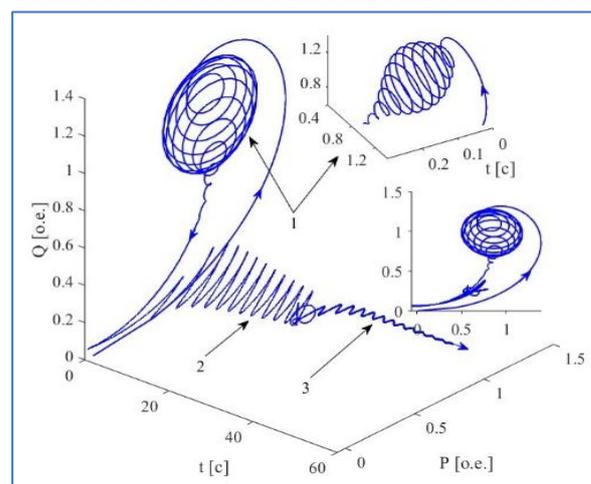


Рис. 6. Изменения активной (P) и реактивной (Q) мощностей АД в режиме затухающих колебаний (3D) и проекция на плоскость PQ (длина кабеля – 18,5 м.)

Fig. 6. Changes in the active (P) and reactive (Q) power of the AM in the damped oscillation mode (3D) and projection onto the PQ plane (cable length – 18.5 m.)

Для получения результатов численного моделирования использована инструментальная среда визуального программирования Matlab/Simulink.

Результаты расчетов представлены на Рис. 3,4 и на Рис. 5,6,7, где обозначены траектории (Рис. 3,4):

1- изменения электромагнитного момента (M) АД во время действия переходных электромагнитных явлений $t[c] \in \{0...0,4\}$;

2- возникновения скрытых колебаний (self-excited hidden oscillation) электромагнитного момента (M) АД $t[c] \in \{>0,4...30\}$;

3- изменения (затухание колебаний) M при выходе из режима скрытых колебаний $t[c] \in \{>30...60\}$;

4- возникновения скрытых колебаний упругого момента (M_{st}), действующего на корпус статора АД $t[c] \in \{>0,4...30\}$;

5- изменения M_{st} при выходе из режима скрытых колебаний $t[c] \in \{>30...60\}$.

На Рис. 5, 6:

1- изменения активной (P) и реактивной (Q) мощностей АД во время действия переходных электромагнитных явлений $t[c] \in \{0...0,4\}$;

2- возникновения скрытых колебаний (self-excited hidden oscillation) потребляемых АД активной (P) и реактивной (Q) мощностей АД $t[c] \in \{>0,4...30\}$;

3- изменения (затухание колебаний) активной (P) и реактивной (Q) мощностей АД при выходе из режима скрытых колебаний $t[c] \in \{>30...60\}$;

Обсуждение.

Сразу отметим, что (ис. 3, 4) частота колебаний электромагнитного момента (M) АД (возбудителя колебаний) в режиме пуска при $t[c] \in \{0...0,5\} \approx 20$ Гц. В это время на электромеханическую систему комбайна КСП-32 действует существенно изменяемый по амплитуде электромагнитный момент АД (Рис. 3, линия 1), что равносильно эффекту действия на систему (в опыте Зоммерфельда) электромагнитного момента электродвигателя постоянного тока с грузиком, расположенном эксцентрично оси вращения якоря с частотой $\approx 5,2$ Гц.

Достижимая максимальная угловая скорость вращения ротора АД $\omega \approx 1,1$ [о.е.] при $t=0,7$ с, которая затем снижается до среднего значения $\omega \approx 0,8$ [о.е.]. Выполняется основное условие возникновения эффекта Зоммерфельда – наличие [3] «...любого вида возбудителя колебаний» и его особенность «...застревания скорости вращения вала двигателя на упругом основании».

Нужно обратить внимание, что (см. Рис. 3, проекция на плоскость ω, M) колебания электромагнитного момента АД происходят по его *статическим* механическим характеристикам ($\omega=f(M)$) АД, так как электромагнитные переходные явления к этому моменту времени (при $t>1$ с.) уже прекращены. Они (характеристики), естественно, отличаются друг от друга из-за *одновременных* изменений мгновенных значений амплитуд питающего напряжения АД и из-за изменения абсолютной скорости вращения электромагнитного поля статора АД. Каждому моменту времени соответствует своя т.н.

фазовая характеристика, у которой *синхронная* скорость вращения ротора изменяется из-за изменения абсолютной скорости вращения электромагнитного поля статора АД, а значения критического момента – из-за потери напряжения. Совокупное изменение напряжения питания АД и частоты вращения электромагнитного поля статора приводят к появлению характерной замкнутой формы зависимости (Рис. 3) $\omega=f(M)$ (скрытый аттрактор) в виде условной «восьмерки».

При этом изменения для: $M[\text{о.е.}] \in \{0,42...0,90\}$, $\omega[\text{о.е.}] \in \{0,58...0,92\}$. Частота установившихся «механических» колебаний (Рис. 3, линия 2) $\approx 0,4$ Гц. Угловая средняя скорость ротора «застревает» на уровне 0,8 от геометрической синхронной скорости АД (157 рад/с).

Достижимая максимальная угловая скорость корпуса статора, физически ощущаемая как «толчок» $\omega_{st} [\text{о.е.}] \approx 0,23$ при $t=0,6$ с. длительностью $\approx 1,2$ с. Диапазон установившихся колебаний по Рис. 3, линия 4 – $\omega_{st}[\text{о.е.}] \in \{-0,15...0,15\}$. Проекция линии 2 на плоскость ω_{st}, M_{st} (рис.3) визуализирует т.н. скрытые колебания, аналогичные обнаруженным в моделях буровых станках [11,12].

Колебания мгновенных значений коэффициента мощности – $\cos(\varphi)$ при $t[c] \in \{0; 0,5\}$ находятся в диапазоне от 0,45 до 0,92. Далее при $t[c] \in \{>0,5...30,0\}$ наблюдаются периодические колебания со средним значением $\cos(\varphi) \approx 0,812$ и дальнейшим повышением его (после переключения со Y на Δ) при $t[c]>30,0$ до 0,918. При этом частота скрытых колебаний $\cos(\varphi)$ как и везде – 0,4 Гц.

Изменения потребляемых мгновенных значений активной¹ мощности (P) находятся в диапазоне ΔP [о.е.] $\in \approx \{0,3...0,6\}$, реактивной (Q) – в диапазоне ΔQ [о.е.] $\in \approx \{0,1...0,5\}$, а полной (S) – ΔS [о.е.] $\in \approx \{0,2...0,6\}$ – Рис. 5.

После выхода из режима скрытых колебаний значения потребляемых мощностей фиксируются на уровнях [о.е.]: $S \approx 0,40$; $P \approx 0,3$; $Q \approx 0,26$.

При существенном изменении длины питающего кабеля (уменьшении в 20 раз до 18,5 м.) также наблюдается возникновение колебаний. Но они затухающие, связаны просто с первоначальным «толчком» корпуса (действием M_{st} , см. Рис. 4,6) и выглядят «традиционно» в соответствии с правилом А.Ю. Ишлинского. Застревание угловой скорости в этом случае объясняется недостаточной величиной питающего напряжения.

На Рис. 7 представлены сравнительные движения годографов в 3D-системе координат мгновенных значений мощностей SPQ (полной $S(t)$, активной $P(t)$ и реактивной $Q(t)$) при двух значительно различающихся длинах питающего кабеля. Наблюдаются существенные скрытые колебания потребляемых мощностей (особенно реактивной), что, есте-

¹ Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высш. Школа, 2001. 327 с. (стр.81)

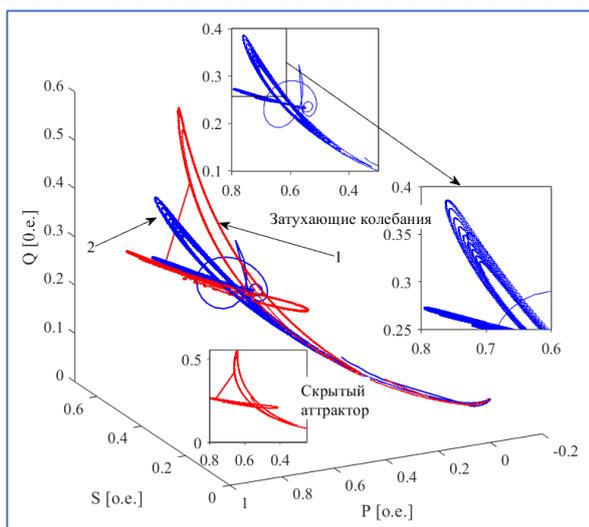


Рис. 7. Голографы концов векторов в 3D пространстве мгновенных значений мощностей SPQ и проекции фрагментов траекторий на плоскость PQ . Линии 1,2 при длине кабеля [м]: 1 – 370,0; 2 – 18,5.
 Fig. 7. Hodographs of the ends of vectors in the 3D space of instantaneous power values SPQ and projections of fragments of trajectories onto the plane PQ . Lines 1,2 with cable length [m]: 1 – 370.0; 2 – 18.5.

ственно, нагружает сеть электроснабжения и источник питания. АД работает в этом режиме с повышенной величиной электрических потерь.

В итоге получается, что результаты расчетов режима пуска цифровой модели электропривода исполнительного органа проходческого комбайна КСП-32 в реальных условиях подтверждают возможность возникновения при определенных условиях скрытых колебаний в электромеханических системах СПМ. При этом происходит увеличение мгновенных значений передаваемой электрической энергии через кабельную сеть и асинхронный электродвигатель в механическое передаточное устройство без совершения полезной работы.

Заключение.

В условиях использования протяженной кабельной сети системы электроснабжения СПМ при прямых пусках АД не исключено появление эффекта Зоммерфельда – возникновение без видимых причин низкочастотных незатухающих колебаний в электромеханической системе проходческого комбайна. При этом происходит «застывание» средней скорости вращения вала двигателя на уровне ниже номинальной, возникновение и рост низкочастотных колебаний электромагнитного момента АД, возникновение и рост амплитуд низкочастотных колебаний активной и реактивной составляющих полной мощности, ухудшающих энергетические показатели работы СПМ. В этой связи можно утверждать, что электромеханические системы самоходных горных машин, как и многие другие, обладают специфическими особенностями формирования своего состояния. В них также при определенных условиях могут возникать скрытые колебания. Теоретическое предсказание этого явления затруднено и может быть обнаружено путем численного моделирования вариантов режимов работы

цифровых двойников самоходных горных машин, что является перспективным направлением дальнейшего изучения их динамики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ещин Е. К. Расчеты динамических режимов работы электроприводов самоходных горных машин // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 534–538. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.534
- Антипов В. Т., Тапехин Н. С., Серов Е. С., Гафанович В. А. Комбайн проходческий КСП-32. Руководство по эксплуатации. АО «Ясиноватский машиностроительный завод»: 1999. Кн. 1. 119 с. <https://www.twirpx.link/file/229007/> (Дата обращения 27.01.2023)
- Кузнецов Н. В. Теория скрытых колебаний и устойчивость систем управления // Известия РАН. Теория и системы управления. 2020. №5. С. 5–27. DOI.org/10.31857/S0002338820050091
- Кузнецов Н. В. Приглашенный секционный доклад «Теория скрытых колебаний и устойчивость систем управления» // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сб. трудов. Т. 1. Уфа, 2019. С. 46–48. <https://www.youtube.com/watch?v=843m-rI5nTM> (Дата обращения 01.02.2023)
- Андронов А. А., Хайкин С. Э. Теория колебаний. М-Л: Главная редакция научно-теоретической литературы, 1937. 536 с. <https://www.twirpx.link/file/1936568/> (Дата обращения 01.02.2023)
- Ginoux J.-M. «Self-Excited Oscillations: from Poincar'e to Andronov» arXiv: Chaotic Dynamics. 2015. n. pag. https://www.researchgate.net/publication/236856896_Self-excited_oscillations_From_Poincare_to_Andronov (Дата обращения 01.02.2023)
- Kiseleva M., Kondratyeva N., Kuznetsov N., Leonov G. Hidden Oscillations in Electromechanical Systems. In: Irschik, H., Belyaev, A., Krommer, M. (eds) Dynamics and Control of Advanced Structures and Machines. Springer, Cham. 2017. https://DOI.org/10.1007/978-3-319-43080-5_13
- Vaziri V., Kapitaniak M., Wiercigroch M. Suppression of drill-string stick-slip vibration by sliding mode control: Numerical and experimental studies / Euro. Jnl of Applied Mathematics. 2018. Vol. 29, Pp. 805–825. Cambridge University Press, 2018. <https://DOI:10.1017/S0956792518000232>
- Vaziri V., Oladunjoye I.O., Kapitaniak M. [et al.] Parametric analysis of a sliding-mode controller to suppress drill-string stick-slip vibration. Meccanica. 2020. 55. 2475–2492/ <https://DOI.org/10.1007/s11012-020-01264-5>
- Mihajlovic N., van Veggel A. A., van de Wouw N., Nijmeijer H. Analysis of friction-induced limit cycling in an experimental drill-string system // Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control: Transactions of the ASME. 2004. Vol. 126(4). Pp. 709–720. <https://DOI.org/10.1115/1.1850535>
- Leonov G. A., Kuznetsov N. V., Kiseleva M. A. [et al.] Hidden oscillations in mathematical model of drilling system actuated by induction motor with a

wound rotor. *Nonlinear Dyn.* 2014. Vol. 77 Pp. 277–288. DOI.org/10.1007/s11071-014-1292-6

12. Леонов Г. А., Киселева М. А. Устойчивость электромеханических моделей буровых установок при резкопеременных нагрузках // Доклады Академии наук. 2012. Том 444 №2. С.160–164. <https://naukarus.com/ustoychivost-elektromehanicheskih-modeley-burovyh-ustanovok-pri-rezkoperemennyh-nagruzkah> (дата обращения 01.02.2023)

13. Leonov G. A. The general linear theory of dynamic vibration absorbers. *Dokl. Phys.* 2017. Vol. 62. Pp. 353–354. <https://DOI.org/10.1134/S1028335817070059>

14. Леонов Г. А. О прохождении через резонанс синхронных электродвигателей, находящихся на упругом основании // Прикладная математика и механика. 2008. Т. 72. № 6. С. 873–881. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11643741> (дата обращения 01.02.2023)

15. Werner U. Analysis of Different Vibration Control Strategies for Soft Mounted Induction Motors with Sleeve Bearings Using Active Motor Foot Mounts. *Journal of Applied Mathematics and Physics.* 2019. Vol. 7. Pp. 611–637. <https://DOI.org/10.4236/jamp.2019.73045>

16. Леонов Г. А., Кондратьева Н. В. Анализ устойчивости электрических машин переменного тока. Санкт-Петербург : Изд-во С.-Петербургского ун-та, 2009. 258 с. ISBN 978-5-288-04798-5

17. Sommerfeld A. Beitrage zum dynamischen Ausbau der Festigkeitslehre // *Phys. Z.* 1902. Band 3. S. 266–271.

18. Кононенко В. О. Нелинейные колебания механических систем. Избр. труды. Киев: Наук. Думка. 1980. 384 с. <https://www.twirpx.link/file/3343547/> (дата обращения 01.02.2023)

19. Ганиев Р. Ф., Краснопольская Т. С. Научное наследие В. О. Кононенко: Эффект Зоммерфельда – Кононенко // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. №5. С.3–15. DOI: 10.31857/S023571190001552-8

20. Balthazar J. M., Tusset A. M., Brasil R.M.L.R.F. [et al.] An overview on the appearance of the Sommerfeld effect and saturation phenomenon in non-ideal vibrating systems (NIS) in macro and MEMS scales. *Nonlinear Dyn.* 2018. 93. 19–40. <https://DOI.org/10.1007/s11071-018-4126-0>

21. Гуськов А. М., Пановко Г. Я. Расчет периодических движений в задаче Зоммерфельда о взаимодействии механических систем с двигателем ограниченной мощности // Вестник технического развития. 2012. № 6(58). 2012. С. 14–20. <https://vntr.ru/fpgetfile.php?id=604> (Дата обращения 22.01.23)

22. Varanis M., Balthazar J. M., Silva A., Mereles A. G., Pederiva R. Remarks on the Sommerfeld effect characterization in the wavelet domain. *Journal of Vibration and Control.* 2018. Vol. 25, Iss. 1. DOI:10.1177/1077546318771804

23. Samantaray A. K. Efficiency considerations for Sommerfeld effect attenuation. // *Proceedings of*

the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. April 2021. DOI:10.1177/0954406221991584

24. Кузнецов Н. В. Аналитико-численные методы исследования скрытых колебаний: Автореф. дисс...докт. физ.-мат. наук. СПб : Санкт-Петербургский государственный университет, 2016. 30 с.

25. Pham V.-T. [et al.] (eds.), *Nonlinear Dynamical Systems with Self-Excited and Hidden Attractors, Studies in Systems, Decision and Control* 133. https://DOI.org/10.1007/978-3-319-71243-7_17

26. Danca M.-F., Lampart M. Hidden and self-excited attractors in a heterogeneous Cournot oligopoly model. *Chaos, Solitons & Fractals.* 2021. Vol. 142. 110371. <https://DOI.org/10.1016/j.chaos.2020.110371>.

27. Zhang L., Liu Y., Wei Z. [et al.] Hidden attractors in a class of two-dimensional rational memristive maps with no fixed points. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 231. 2022. 2173–2182. <https://DOI.org/10.1140/epjs/s11734-022-00483-z>

28. Ali, Ahmed, Al-Baghdadi, Ahmed. A 3D-Chaotic Oscillator with Hidden Attractor: Dynamics and Analysis // *International Journal on Electrical Engineering and Informatics.* 2022. 14. 782–789. DOI:10.15676/ijeei.2022.14.4.4

29. Загривный Э. А., Басин Г. Г. Формирование внешней динамики горных машин // Записки Горного института. 2016. Т. 217. С.140–149. https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5092?setLocale=ru_RU

30. Ганиев Р. Ф. Нелинейные резонансы и катастрофы. Надежность, безопасность и бесшумность. Москва, Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2013. 592 с. ISBN 978-5-93972-960-4. <https://www.iprbookshop.ru/28905.html> (Дата обращения: 27.01.2023)

31. Ещин Е. К., Соколов И. А. Совершенствование расчетов динамических режимов работы электроприводов // Изв. вузов. Электромеханика. 2017. Т. 60. № 3. С. 54–59. DOI:10.17213/0136-3360-2017-3-54-59.

32. Wei Sun, Jianan Du, Lintao Wang, Penglong Luan, And Jie Li. Hierarchical Modelling and Dynamic Analysis of Hoist System in Electric Mining Shovel. *Shock and Vibration.* Vol. 2018. ID 5017564, 15 pages. <https://DOI.org/10.1155/2018/5017564>

33. Park R. H. Two Reaction Theory of Synchronous Machines. Generalized Method of Analysis-Part I. https://www.academia.edu/10137515/Two_Reaction_Theory_of_Synchronous_Machines_Generalized_Method_of_Analysis_Part_I (Дата обращения 27.01.2023)

34. Горев А. А. Переходные процессы синхронной машины. Л.-М : Государственное энергетическое издательство, 1950. 551 с. http://publ.lib.ru/ARCHIVES/G/GOREV_Aleksandr_Aleksandrovich/_Gorev_A.A..html#0001 (Дата обращения 01.02.2023)

35. Ковач К. П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. М.-Л. : Госэнергоиздат, 1963. 744 с. <https://www.twirpx.link/file/115481/> (дата обращения 01.02.2023).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Ещин Евгений Константинович, доктор техн. наук, профессор, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, Россия, Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: eke_kuzstu@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Ещин Е.К. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; выводы; написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-3-3-12

Evgeniy K. Eshchin

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

*E-mail: eke_kuzstu@mail.ru

FEATURES OF DYNAMIC PROCESSES OF SELF-PROPELLED MINING MACHINES

Abstract.

The possibility of occurrence under certain conditions of the so-called "hidden oscillation" in the electromechanical systems of tunneling machines such as self-propelled mining machines located on an elastic base and receiving electrical energy through an extended cable network. Attention is drawn to the fact that by its impact on the mechanical transmission device (reducer) and the machine body, the mode of starting the asynchronous electric motor (IM) of the electric drive of the executive body by direct connection to the network is equivalent to the operation of a DC motor in the Sommerfeld experiment with an eccentrically located weight at its impact on the foundation of the engine, which in this experiment is also on an elastic foundation. In the considered version of the electric drive of the tunneling machines, the resulting changes in the position of the IM stator housing due to its mobility (base elasticity) can lead to changes in the absolute speed of rotation of the stator electromagnetic field, which can lead to a change in the instantaneous values of the IM electromagnetic torque and the occurrence of oscillations in the entire electromechanical system of the electric drive which can be classified as hidden (hidden oscillations). As an example, the starting mode of the electric drive of the executive body of the roadheader KSP-32 in a real power supply system is considered. Graphical results of calculations are given. It is concluded that in the electromechanical systems of self-propelled mining machines, under certain conditions during start, one can observe the manifestation of the Sommerfeld effect in the form of the occurrence of low-frequency hidden oscillations in the electromechanical system, accompanied by significant fluctuations in the AM power factor and, in particular, by oscillations in active and reactive power. The theoretical prediction of this phenomenon is difficult and can be detected by numerical simulation of the operating modes of the digital twin of the mining machine.



Article info

Received:

21 March 2023

Accepted for publication:

15 June 2023

Accepted:

27 June 2023

Published:

11 July 2023

Keywords: tunneling machine, asynchronous electric motor, electric drive, hidden oscillations, Sommerfeld effect.

For citation: Eshchin E.K. Features of dynamic processes of self-propelled mining machines. Mining Equipment and Electromechanics, 2023; 3(167):3-12 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2023-3-3-12, EDN: MMHUMB

REFERENCES

1. Eshchin E.K. Calculations of dynamic modes of operation of electric drives of self-propelled mining machines. *Zapiski Gornogo instituta*. 2018; 233:534–538. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.534
2. Antipov V.T., Tapekhin N.S., Serov E.S., Gafa-novich V.A. Roadheader KSP-32. Manual. JSC «Yasinovatsky Machine-Building Plant»: 1999. Book. 1. 119 p. <https://www.twirpx.link/file/229007/> (Accessed 01/27/2023)
3. Kuznetsov N.V. Theory of hidden oscillations and stability of control systems. *Izvestiya RAN. Theory and control systems*. 2020; 5:5–27. DOI.org/10.31857/S0002338820050091
4. Kuznetsov N.V. Invited section report «Theory of hidden vibrations and stability of control systems». *XII All-Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics: Sat. works*. 2019; 1:46–48. <https://www.youtube.com/watch?v=843m-rI5nTM> (Accessed 02/01/2023)
5. Andronov A.A., Khaikin S.E. Theory of vibrations. M-L: Main edition of scientific - theoretical literature; 1937. 536 p. <https://www.twirpx.link/file/1936568/> (Accessed 02/01/2023)
6. Ginoux J.-M. «Self-Excited Oscillations: from Poincar'e to Andronov». arXiv: Chaotic Dynamics. 2015. n. pag. https://www.researchgate.net/publication/236856896_Self-excited_oscillations_From_Poincare_to_Andronov (Accessed 02/01/2023)7.
7. Kiseleva M., Kondratyeva N., Kuznetsov N., Leonov G. Hidden Oscillations in Electromechanical Systems. In: Irschik, H., Belyaev, A., Krommer, M. (eds) *Dynamics and Control of Advanced Structures and Machines*. Springer, Cham. 2017. https://DOI.org/10.1007/978-3-319-43080-5_13
8. Vaziri V., Kapitaniak M., Wiercigroch M. Suppression of drill-string stick-slip vibration by sliding mode control: Numerical and experimental studie. *Euro. Jnl of Applied Mathematics*. 2018; 29:805–825. Cambridge University Press. <https://doi:10.1017/S0956792518000232>
9. Vaziri, V., Oladunjoye I.O., Kapitaniak M. [et al.] Parametric analysis of a sliding-mode controller to suppress drill-string stick-slip vibration. *Meccanica*. 2020; 55:2475–2492. <https://DOI.org/10.1007/s11012-020-01264-5>
10. Mihajlovic N., van Veggel A.A., van de Wouw N., Nijmeijer H. Analysis of friction-induced limit cycling in an experimental drill-string system. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control: Transactions of the ASME*. 2004; 126(4):709–720. <https://DOI.org/10.1115/1.1850535>
11. Leonov G.A., Kuznetsov N.V., Kiseleva M.A. [et al.] Hidden oscillations in mathematical model of drilling system actuated by induction motor with a wound rotor. *Nonlinear Dyn*. 2014; 77:277–288. DOI.org/10.1007/s11071-014-1292-6
12. Leonov G.A., Kiseleva M.A. Stability of electromechanical models of drilling rigs under sharply variable loads. *Reports of the Academy of Sciences*. 2012; 444(2):160–164. <https://naukarus.com/ustoychivost-elektromehaniicheskikh-modeley-burovyih-ustanovok-pri-rezkoperemennyh-nagruzkah> (accessed 01.02.2023)
13. Leonov G.A. The general linear theory of dynamic vibration absorbers. *Dokl. Phys*. 2017; 62: 353–354. <https://DOI.org/10.1134/S1028335817070059>
14. Leonov, G.A. On the passage through resonance of synchronous electric motors located on an elastic foundation. *Applied Mathematics and Mechanics*. 2008; 72(6):873–881. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11643741> (accessed 01.02.2023)
15. Werner U. Analysis of Different Vibration Control Strategies for Soft Mounted Induction Motors with Sleeve Bearings Using Active Motor Foot Mounts. *Journal of Applied Mathematics and Physics*. 2019; 7:611–637. <https://DOI.org/10.4236/jamp.2019.73045>
16. Leonov G.A., Kondratyeva N.V. Analysis of the stability of AC electrical machines. St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg University, 2009. 258 p. ISBN 978-5-288-04798-5
17. Sommerfeld A. Beitrage zum dynamischen Ausbau der Festigkeitslehre, Phys. Z. 1902. Band 3. S. 266-271.
18. Kononenko V.O. Nonlinear oscillations of mechanical systems. Fav. works. Kyiv: Nauk. Dumka; 1980. 384 p. <https://www.twirpx.link/file/3343547/> (accessed 02/01/2023)
19. Ganiev R.F., Krasnopolskaya T.S. Scientific heritage of V.O. Kononenko: The Sommerfeld-Kononenko effect. *Problems of mechanical engineering and reliability of machines*. 2018; 5:3–15. DOI: 10.31857/S023571190001552-8
20. Balthazar J.M., Tusset A.M., Brasil R.M.L.R.F. [et al.] An overview on the appearance of the Sommerfeld effect and saturation phenomenon in non-ideal vibrating systems (NIS) in macro and MEMS scales. *Nonlinear Dyn*. 2018; 9:19–40. <https://DOI.org/10.1007/s11071-018-4126-0>
21. Guskov A.M., Panovko G.Ya. Calculation of periodic motions in the Sommerfeld problem on the interaction of mechanical systems with a limited power engine / *Bulletin of Scientific and Technical Development*. 2012; 6(58):14–20. <https://vntr.ru/ftpgetfile.php?id=604> (Accessed 22.01.23)
22. Varanis M., Balthazar J.M., Silva A., Mereles A.G., Pederiva R. Remarks on the Sommerfeld effect characterization in the wavelet domain. *Journal of Vibration and Control*. 2018; 25(1). DOI:10.1177/1077546318771804
23. Samantaray A.K. Efficiency considerations for Sommerfeld effect attenuation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. April 2021. DOI:10.1177/0954406221991584
24. Kuznetsov N.V. Analytical and numerical methods for studying hidden oscillations: Abstract of

the thesis. diss ... doc. Phys.-Math. Sciences. St. Petersburg: St. Petersburg State University, 2016. 30 p.

25. V.-T. Pham [et al.] (eds.), Nonlinear Dynamical Systems with Self-Excited and Hidden Attractors, Studies in Systems, Decision and Control 133, https://DOI.org/10.1007/978-3-319-71243-7_17

26. Danca M.F., Lampart M. Hidden and self-excited attractors in a heterogeneous Cournot oligopoly model. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2021; 142:110371. ISSN 0960-0779, <https://DOI.org/10.1016/j.chaos.2020.110371>.

27. Zhang L., Liu Y., Wei Z. [et al.] Hidden attractors in a class of two-dimensional rational memristive maps with no fixed points. *Eur. Phys. J. Spec. top*. 2022; 231:2173–2182. <https://DOI.org/10.1140/epjs/s11734-022-00483-z>

28. Ali, Ahmed & Al-Baghdadi, Ahmed. A 3D Chaotic Oscillator with Hidden Attractor: Dynamics and Analysis. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*. 2022; 14:782–789. DOI:10.15676/ijee.2022.14.4.4

29. Zagrivny E.A., Basin G.G. Formation of the external dynamics of mining machines. Notes of the Mining Institute. 2016; 217:140–149. https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5092?setLocale=ru_RU

30. Ganiev R.F. Nonlinear resonances and catastrophes. Reliability, safety and noiselessness. Moscow, Izhevsk: Regular and Chaotic Dynamics; 2013. 592 p.

ISBN 978-5-93972-960-4.
<https://www.iprbookshop.ru/28905.html> (Date of access: 01/27/2023)

31. Eshchin E.K., Sokolov I.A. Improving the calculations of dynamic modes of operation of electric drives. *Izv. universities. Electromechanics*. 2017; 60(3):54–59. DOI:10.17213/0136-3360-2017-3-54-59.

32. Wei Sun, Jianan Du, Lintao Wang, Penglong Luan, And Jie Li. Hierarchical Modeling and Dynamic Analysis of Hoist System in Electric Mining Shovel. Shock and vibration. Volume 2018. ID 5017564, 15 pages. <https://DOI.org/10.1155/2018/5017564>

33. Park. R.H. Two Reaction Theory of Synchronous Machines. Generalized Method of Analysis-Part I. https://www.academia.edu/10137515/Two_Reaction_Theory_of_Synchronous_Machines_Generalized_Method_of_Analysis_Part_I (Accessed 01/27/2023)

34. Gorev A.A. Transient processes of a synchronous machine. L.-M: State Energy Publishing House; 1950. 551 p. http://publ.lib.ru/ARCHIVES/G/GOREV_Aleksandr_Aleksandrovich/_Gorev_A.A..html#0001 (Accessed 01.02.2023)

35. Kovach K.P., Rats I. Transient processes in alternating current machines. M.-L.: Gosenergoizdat; 1963. 744 p. <https://www.twirpx.link/file/115481/> (Accessed 02/01/2023)

© 2023 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The author declare no conflict of interest.

About the author:

Evgeniy K. Eshchin, Dr. Sc. in Engineering, Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: eke_kuzstu@mail.ru

Contribution of the authors:

Evgeniy K. Eshchin – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualization of research; writing the text, data collection; data analysis; drawing the conclusions; writing the text.

Author have read and approved the final manuscript.

