АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.313-57

Методика расчета частоты плавных пусков инерционных асинхронных электроприводов

М.В. Вечеркин, А.С. Сарваров, А.В. Макаров
ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,
г. Магнитогорск, Российская Федерация
E-mail: vecherkin@inbox.ru, anvar@magtu.ru, aleksandr1990makarov@gmail.com

Авторское резюме

Состояние вопроса: Существующие методики расчета допустимой частоты пусков асинхронных двигателей ориентированы преимущественно на соблюдение условий допустимого нагрева двигателя и не учитывают негативное влияние колебательной составляющей переходного электромагнитного момента. Различные способы пуска неравнозначны по степени ограничения колебательной составляющей момента и, соответственно, по степени снижения негативного влияния переходных пусковых процессов. При реализации одного из способов облегчения пуска встают задачи выбора оптимального пускового режима и определения допустимой частоты пусков. Решение этих задач требует введения количественных критериев, определяющих наличие колебательной составляющей и чувствительных к изменениям условий пуска. Наличие таких критериев позволяет решать как теоретические, так и практические задачи оптимального управления переходными пусковыми процессами.

Материалы и методы: Исходными данными для исследования являются паспортные характеристики высоковольтного асинхронного двигателя и мощного центробежного вентилятора. Для получения массивов численных данных и обработки результатов использованы стандартные модели асинхронного двигателя и токоограничивающего пускового реактора, построенные в пакете Simulink среды Matlab.

Результаты: Разработана методика расчета допустимой частоты плавных пусков в год при реализации выбранного способа и режима пуска, основанная на анализе количественных критериев, отражающих степень колебательной составляющей электромагнитного момента асинхронного двигателя.

Выводы: Предложенная методика может являться основой для оценки возможности перевода инерционных асинхронных электроприводов из продолжительного режима работы в периодический повторно-кратковременный в целях повышения их энергоэффективности без сокращения ресурса.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, инерционный электропривод, прямой пуск, плавный пуск, реакторный пуск, электромагнитный момент, тиристорный регулятор напряжения.

A procedure of calculating the permissible number of soft starts for induction electric drives with a high moment of inertia

M.V. Vecherkin, A.S. Sarvarov, A.V. Makarov
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation
E-mail: vecherkin@inbox.ru, anvar@magtu.ru, aleksandr1990makarov@gmail.com

Abstract

Background: The existing methods of calculating the permissible number of starts of induction motors are primarily focused on maintaining the permissible conditions of engine heating and do not take into account the negative impact of the oscillatory component of the transient electromagnetic moment. The start-up methods differ in the degree of limiting the oscillatory component of torque and, consequently, in the degree of reduction of the negative impact of transient start-up processes. When implementing one of the ways of facilitating start-up, we face the problem of selecting the optimal start-up mode and determining the permissible number of starts. These problems can be solved by introducing quantitative criteria determining the presence of the oscillatory component and susceptible to the changes in the start-up

conditions. Such criteria can help to solve both theoretical and practical problems of achieving the optimal control of transient start-up processes.

Materials and methods: The initial data for the study are the passport specifications of a high-voltage induction motor and a powerful centrifugal fan. To obtain arrays of numerical data and to process the results, we used standard models of the induction motor and the current limiting starting reactor built in the Simulink package of the Matlab environment.

Results: We have developed methods for calculating the permissible number of soft starts per year during the implementation of the selected method and the starting mode, based on the analysis of quantitative criteria reflecting the degree of the oscillatory component of the induction motor electromagnetic moment.

Conclusions: The proposed methods can become the basis for evaluating the possibility of switching inertial induction electric drives from continuous operation to the periodic intermittent mode to increase their energy efficiency without reducing the resource.

Key words: induction motor, inertial electric drive, DOL, soft start, reactor start, electromagnetic torque, thyristor voltage regulator.

DOI: 10.17588/2072-2672.2018.1.059-064

Введение. Известно, что асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором имеют наиболее массовое применение и потребляют до половины всей вырабатываемой в мире электроэнергии. Соответственно, в области эксплуатации таких электроприводов имеется существенный резерв энергосбережения. Одним из эффективных энергосберегающих мероприятий является перевод нерегулируемых электроприводов из продолжительного режима работы в периодический повторно-кратковременный там, где существует потребность по условиям технологии. Наибольший экономический эффект может быть получен для мощных высоковольтных электроприводов, большинство из которых являются инерционными. Под инерционными понимаются электроприводы с суммарным приведенным моментом инерции, превышающим двукратный момент инерции ротора [1]. Реализации такого пути препятствуют общеизвестные тяжелые условия прямого пуска мощных АД. Для высоковольтных АД мощностью свыше 800 кВт прямой пуск следует считать аварийно-опасным режимом работы и признаком низкой технической культуры обслуживающего персонала [2]. Считается, что каждый прямой пуск таких двигателей сокращает интервал между капитальными ремонтами на 50–200 часов.

Количество прямых пусков мощных высоковольтных АД лимитируется заводом-изготовителем, является паспортной характеристикой и может составлять от 250 до 500 пусков в год.

Для полной или частичной нейтрализации негативного влияния переходных процессов могут быть реализованы различные способы пуска: реакторный; автотрансформаторный; пуск с помощью тиристорного регулятора напряжения (ТРН), преобразователя частоты (ПЧ) или трансформаторно-тиристорного пускового устройства (ТТПУ) [3]. При реализации одного из перечисленных способов количество пусков может быть увеличено без ущерба для технического состояния и ресурса двигателя.

Как известно, главными факторами, обуславливающими негативное влияние пусковых процессов, являются большие пусковые токи и колебания электромагнитного момента значительной амплитуды. Совокупность этих факто-

ров оказывает негативное влияние на механическую и электромагнитную систему АД, а также его тепловое состояние.

Существующие методики расчета частоты пусков ориентированы на соблюдение условия допустимого нагрева и основываются на оценке тепловых потерь в двигателе [4, 5]. Негативное влияние колебательной составляющей момента при этом не учитывается. В то же время энергия колебаний электрических и механических величин в двигателе не совершает полезной работы и переходит в тепло или в работу по деформации и разрушению электромагнитной и механической части электропривода. При этом колебания энергии однозначно определяются колебаниями электромагнитного момента.

Различные способы пуска неравнозначны как по затратам, так и по степени ограничения колебательной составляющей электромагнитного момента.

Таким образом, требуют решения следующие задачи:

1. Исследовать влияние различных способов пуска на степень колебательности пускового электромагнитного момента мощного инерционного асинхронного электропривода.
2. Разработать методику оценки влияния различных способов пуска на величину допустимой частоты пусков.

Методы исследования. В качестве объекта исследования выбран электропривод центробежного вентилятора, оснащенный высоковольтным АД с короткозамкнутым ротором. Основные технические характеристики двигателя приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные технические данные исследуемого двигателя

Характеристика	Значение
Мощность, кВт	800
Напряжение питания, В	6000
Частота вращения, об/мин	1480
Номинальный момент двигателя, Н·м	5140
Коэффициент полезного действия, %	95,1
Момент инерции ротора, кг·м ²	26
Интервал между пусками Δt , не менее, ч	3
Количество прямых пусков в год $N_{\text{доп}}$, не более	500

Вентилятор имеет рабочее колесо с моментом инерции $J = 250 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. При таком инерционном рабочем органе количество значительных по величине бросков ударного электромагнитного момента АД при пуске может достигать нескольких десятков.

В современных условиях анализ пусковых режимов рационально вести средствами компьютерного моделирования. В работе использовались апробированные имитационные модели, построенные в пакете Simulink среды Matlab на основе известного математического аппарата [6].

На рис. 1,а в относительных единицах приведена расчетная осциллограмма зависимости электромагнитного момента двигателя от времени, полученная при исследовании модели описываемого электропривода. Рис. 1,б показывает выделенную колебательную составляющую момента, полученную с помощью цифрового фильтра Баттерворта восьмого порядка с частотой среза 10 Гц.

а)

б)

Рис. 1. Зависимость электромагнитного момента от времени при прямом пуске: а — расчетная осциллограмма; б — выделенная колебательная составляющая

При использовании различных способов облегчения пуска амплитуды ударных моментов принимают значения меньшие, чем при прямом пуске. В качестве примера на рис. 2 показаны расчетные осциллограммы, полученные при моделировании реакторного пуска (рис. 2,а) и двух режимов пуска с помощью ТРН (рис. 2,б).

Сравнительный анализ осциллограмм показывает, что задача ограничения колебательной составляющей наиболее эффективно может

быть решена при использовании ТРН и выборе оптимального по критерию минимума колебательной составляющей пускового режима [7]. Однако стоимость высоковольтных пускателей на основе ТРН продолжает оставаться высокой, поэтому остаются актуальными относительно недорогие реакторный и автотрансформаторный способы, которые во многих случаях могут обеспечить удовлетворительные результаты по снижению динамических нагрузок на электропривод, возникающих при пуске [8].

В реальных условиях эксплуатации при использовании одного из способов облегченного пуска возникает проблема определения допустимой частоты пусков выбранным способом. Решение этой задачи требует введения количественных критериев, отражающих степень колебательности пускового момента.

Колебательная составляющая может оцениваться различными способами, например по максимальной амплитуде или кратности начального размаха колебаний. Однако, как показано в [9], эти параметры недостаточно информативны, так как изменение условий пуска оказывает на них слабое влияние. Кроме этого, данные параметры не учитывают количество бросков момента и не являются универсальными, т. е. не могут быть применены для любого из известных способов пуска.

а)

б)

Рис. 2. Расчетные осциллограммы электромагнитного момента: а — реакторный пуск; б — мягкий пуск; 1 — высокий темп нарастания напряжения; 2 — низкий темп нарастания напряжения

Результаты исследования. Для оценки колебательной составляющей момента при различных способах и режимах пуска предлагается использовать интегральный параметр – средне-квадратичное значение (СКЗ) колебательной составляющей электромагнитного момента за время пуска АД [9]:

$$M_{\text{СКЗ}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{пуск}}} \int_0^{t_{\text{пуск}}} (M(t))^2 dt}, \quad (1)$$

где $M(t)$ – зависимость колебательной составляющей электромагнитного момента от времени; $t_{\text{пуск}}$ – время пуска двигателя.

Данный параметр рассчитывается по выделенной из расчетных осциллограмм колебательной составляющей электромагнитного момента (рис. 1 б). Параметр $M_{\text{СКЗ}}$ является интегральным и может быть применен к любому из способов и режимов пуска. Исследование компьютерной модели показывает, что параметр $M_{\text{СКЗ}}$ весьма чувствителен к изменениям условий пуска. В табл. 2 приведены значения параметра $M_{\text{СКЗ}}$ для прямого пуска при различных значениях суммарного момента инерции J_{Σ} на валу двигателя и различных соотношениях между номинальным моментом M_n и моментом сопротивления M_c .

Таблица 2. Значения интегральных критериев при различных условиях прямого пуска

Условия пуска	$J_{\Sigma},$ кг·м ²	$M_{\text{СКЗ}},$ (Н·м)
Пуск в режиме холостого хода $M_c = 0$	26	2340
Пуск вентилятора на закрытую дроссельную заслонку	276	4310
Пуск вентилятора на закрытую дроссельную заслонку	376	4600
Пуск с реактивным моментом на валу $M_c = 0,4M_n$	276	4710
Пуск с реактивным моментом на валу $M_c = 0,4M_n$	376	4990
Пуск с реактивным моментом на валу $M_c = M_n$	276	5680
Пуск с реактивным моментом на валу $M_c = M_n$	376	5860

Для сравнительного анализа введем безразмерный параметр – кратность СКЗ колебательной составляющей относительно СКЗ колебательной составляющей при прямом пуске:

$$k_{M_0} = \frac{M_{\text{СКЗ}}}{M_{\text{СКЗ}_0}}, \quad (2)$$

где $M_{\text{СКЗ}}$ – СКЗ колебательной составляющей момента при исследуемом способе пуска; $M_{\text{СКЗ}_0}$ – СКЗ колебательной составляющей при прямом пуске.

Этот параметр определяет долю колебательной составляющей при выбранном способе

и режиме пуска относительно колебательной составляющей при прямом пуске. Очевидно, что $k_{M_0} = 1$ соответствует условиям прямого пуска; $k_{M_0} < 1$ – условиям лучшим, чем при прямом пуске; $k_{M_0} > 1$ – условиям худшим, чем при прямом пуске. Последнее возможно при реверсе, самозапуске, торможении противовключением.

В табл. 3 приведены значения параметров $M_{\text{СКЗ}}$ и k_{M_0} для пусковых процессов, показанных на рис. 1, 2.

Анализ полученных данных показал, что в рассматриваемых случаях реакторный пуск позволяет втрое снизить СКЗ колебательной составляющей момента по сравнению с прямым пуском, а мягкий пуск – в 10–100 раз, в зависимости от выбранного режима управления ТРН.

На основании этого можно утверждать, что применение устройств мягкого пуска на основе ТРН позволяет полностью снять ограничения на количество пусков в год, обусловленные колебательной составляющей момента, и выдерживать лишь ограничения, связанные с условиями допустимого нагрева.

Таблица 3. Значения интегральных критериев при различных способах пуска

Способ пуска	$M_{\text{СКЗ}},$ (Н·м)	k_{M_0}
Прямой пуск (рис. 1, а)	4310	1,0
Реакторный пуск (рис. 2, а)	1424	0,33
Плавный пуск (рис. 2, б, кривая 1)	391	0,091
Плавный пуск (рис. 2, б, кривая 2)	44,3	0,01

При реализации других способов пуска колебательная составляющая ограничивается в меньшей степени и пренебрегать ее негативным влиянием нельзя. Для расчета допустимого количества пусков в этих случаях предлагается следующая методика.

Исходными данными для расчета являются расчетный критерий k_{M_0} и установленное заводом-изготовителем допустимое количество прямых пусков в год $N_{\text{доп}}$.

Рассмотрим ситуацию, когда асинхронный двигатель с допустимым числом прямых пусков $N_{\text{доп}}$ эксплуатируется с возможностью реализации прямого и реакторного пусков. Пусть колебательная составляющая момента определяется параметром $k_{M_0} = k_p$. В ситуациях, когда необходим прямой пуск, $k_{M_0} = k_{\text{пр}}$, по определению.

Очевидно, что количество прямых пусков $N_{\text{пр}}$ должно удовлетворять неравенству:

$$N_{\text{пр}} \leq N_{\text{доп}}, \quad (3)$$

где $N_{\text{пр}}$ – количество произведенных прямых пусков в год.

Это неравенство с учетом того, что $k_{пр} = 1$, можно переписать в виде

$$N_{пр} k_{пр} \leq N_{доп} \quad (4)$$

При реализации реакторного пуска негативное влияние переходных процессов снижается, а параметр (2) принимает значение меньшее, чем при прямом пуске. Для реакторного пуска может быть записано неравенство

$$N_p k_p \leq N_{доп} \quad (5)$$

Тогда допустимое количество реакторных пусков составит

$$N_p \leq \frac{N_{доп}}{k_p} \quad (6)$$

Так, при реакторном пуске двигателя с параметрами, приведенными в табл. 1, при $k_p = 0,33$ допустимое число реакторных пусков в год составит $N_p \leq 1500$. Соответственно, в сутки допустимы 4 пуска.

Аналогичный расчет для пуска с помощью ТРН при $k_{ТРН} = 0,091$ дает допустимое число пусков в год $N_{ТРН} = 5494$, или 15 пусков в сутки. Полученный результат позволяет запускать двигатель один раз в 1,5 часа. Однако это меньше допустимого интервала между пусками $\Delta t = 3$ ч, установленного заводом-изготовителем (табл. 1). Таким образом, при любом способе пуска количество пусков не должно превышать значения

$$N' = \frac{24}{\Delta t}, \quad (7)$$

где Δt – интервал между пусками, час, по паспорту двигателя.

В рассматриваемом случае – это 8 пусков в сутки.

При эксплуатации электропривода возможна ситуация, когда пуск двигателя осуществляется разными способами. Обычно это сочетание прямого пуска с одним из способов облегченного пуска. В этом случае допустимое количество пусков для сочетания реакторного и прямого пусков определяется неравенством

$$N_p k_p + N_{пр} \leq N_{доп} \quad (8)$$

В общем случае, если используются различные способы пуска, выполняется неравенство

$$N_{пр} + \sum_{i=1}^n N_i k_i \leq N_{доп}, \quad (9)$$

где n – количество используемых способов облегченного пуска; N_i – число пусков данным способом; k_i – кратность СКЗ колебательной составляющей данного способа пуска относительно СКЗ колебательной составляющей при прямом пуске.

Следует руководствоваться условием (9) при обязательном соблюдении условия (7).

Выводы. На основе исследований установлено, что среднеквадратичное значение колебательной составляющей электромагнитного момента за время пуска АД, полученное из рас-

четных осциллограмм, является наиболее чувствительным к изменениям условий прямого пуска.

На основе введения безразмерного интегрального параметра – кратности СКЗ колебательной составляющей относительно СКЗ колебательной составляющей при прямом пуске получена возможность количественной оценки влияния различных способов пуска на улучшение показателей по увеличению количества пусков в год.

Предложенная методика расчета допустимой частоты пусков в год при реализации внедряемого в эксплуатацию пускового устройства может быть использована для оценки возможности перевода мощных асинхронных электроприводов в энергоэффективный периодический повторно-кратковременный режим без сокращения ресурса АД.

Список литературы

1. Петров Л.П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. – М.: Энергоиздат, 1981. – 184 с.
2. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Значение автоматизированного электропривода для модернизации экономики // Труды VII Междунар. (VII Всерос.) науч.-техн. конф. по автоматизированному электроприводу. – Иваново, 2012. – С. 4–9.
3. Вечеркин М.В., Петушков М.Ю., Сарваров А.С. Возможности трансформаторно-тиристорной структуры как пускового устройства высоковольтных асинхронных двигателей // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 1. – С. 88–91.
4. Кравчик А.Э., Стрельбицкий Э.К., Шлаф М.М. Выбор и применение асинхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 96 с.
5. Sarkar D., Naskar A.K. Approximate analysis of transient heat conduction of induction motor during reactor start // Proc. IEEE, India Int. Conference on Power Electronics 2010 (IICPE2010), Delhi, 28–30 Jan, pp. 1–6.
6. Krause P.C., Wasynczuk O., Sudhoff S.D. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. – Wiley-IEEE Press, USA, 2002.
7. Дудкин М.М. Тиристорный регулятор напряжения с адаптивной интегрирующей системой управления для плавного пуска асинхронных электродвигателей // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2014. – Т. 14, № 2. – С. 112–115.
8. Junichi Fukushima, Yoshihisa Uriu, Keita Katayama, Hiroyuki Iki, Yoshihide Kado. A study of transient torque analysis in the squirrel-cage induction motor with reactor and damping resistor starter // Proc. IEEE Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2009 Proceedings of the 44th International, Glasgow, 1–4 Sept. 2009, pp. 1–4.
9. Критерии оценки колебательной составляющей электромагнитного момента при пуске высоковольтных асинхронных двигателей / М.В. Вечеркин, А.С. Сарваров, Е.С. Петрякова и др. // Труды XVI Междунар. науч.-техн. конф. «Электроприводы переменного тока». – Екатеринбург: ФГАОУВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2015. – С. 179–183.

References

1. Petrov, L.P. *Upravlenie puskom i tormozheniem asinkhronnykh dvigateley* [Management of induction motor startup and braking]. Moscow, Energoizdat, 1981. 184 p.
2. Onishchenko, G.B., Yunkov, M.G. Znachenie avtomatizirovannogo elektroprivoda dlya modernizatsii ekonomiki [The meaning of the automatic electric drive for modernization of the economy]. *Trudy VII Mezhdunarodnoy (VII Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Works of the VII International (VII All-Russian) Scientific and Technical Conference on Automatic Electric Drives]. Ivanovo, 2012, pp. 4–9.
3. Vecherkin, M.V., Petushkov, M.Yu., Sarvarov, A.S. Vozmozhnosti transformatorno-tiristornoy struktury kak puskovogo ustroystva vysokovol'tnykh asinkhronnykh dvigateley [Capabilities of the transformer-thyristor structure as a start-up device of high-voltage induction motors]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 1, pp. 88–91.
4. Kravchik, A.E., Strel'bitskiy, E.K., Shlaf, M.M. *Vybor i primeneniye asinkhronnykh dvigateley* [Selection and application of induction motors]. Moscow, Energoatomizdat, 1987. 96 p.
5. Sarkar, D., Naskar, A.K. Approximate analysis of transient heat conduction of induction motor during reactor start. *Proc. IEEE, India Int. Conference on Power Electronics 2010 (IICPE2010)*, Delhi, 28–30 Jan, pp. 1–6.
6. Krause, P.C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S.D. *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. Wiley-IEEE Press, USA, 2002.
7. Dudkin, M.M. Tiristornyy regulyator napryazheniya s adaptivnoy integriruyushchey sistemoy upravleniya dlya pлавного puska asinkhronnykh elektrodvigateley [Thyristor voltage controller with an adaptive integrating control system for soft start-up of induction electric motors]. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»*, 2014, vol. 14, no. 2, pp. 112–115.
8. Junichi, Fukushima, Yoshihisa, Uriu, Keita, Katayama, Hiroyuki, Iki, Yoshihide, Kado. A study of transient torque analysis in the squirrel-cage induction motor with reactor and damping resistor starter. *Proc. IEEE Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2009 Proceedings of the 44th International, Glasgow, 1–4 Sept. 2009, pp. 1–4.
9. Vecherkin, M.V., Sarvarov, A.S., Petryakova, E.S., Makarcheva, E.V., Makarov, A.V. Kriterii otsenki kolebatel'noy sostavlyayushchey elektromagnitnogo momenta pri puske vysokovol'tnykh asinkhronnykh dvigateley [Estimation criteria for the vibration component of electromagnetic moment at the start-up of high-voltage induction motors]. *Trudy Mezhdunarodnoy XVI nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektroprivody peremennogo toka»* [Works of the International XVI Scientific and Technical Conference «AC Electric Drives»]. Ekaterinburg: FGAOUVPO «UrFU imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina», 2015, pp. 179–183.

Вечеркин Максим Викторович,

ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,
кандидат технических наук, доцент кафедры физики,

телефон 8 (3519) 23-57-50,

e-mail: vecherkin@inbox.ru

Vecherkin Maksim Viktorovich,

Nosov Magnitogorsk State Technical University,

Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Physics Department,

telephone 8 (3519) 23-57-50,

e-mail: vecherkin@inbox.ru

Сарваров Анвар Сабулханович,

ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,

доктор технических наук, профессор,

телефон 8 (3519) 22-45-87,

e-mail: anvar@magtu.ru.

Sarvarov Anvar Sabulkhanovich,

Nosov Magnitogorsk State Technical University,

Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral Degree), Professor,

telephone 8 (3519) 22-45-87,

e-mail: anvar@magtu.ru.

Макаров Александр Валерьевич,

ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,

аспирант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники,

e-mail: aleksandr1990makarov@gmail.com

Makarov Aleksandr Valeryevich,

Nosov Magnitogorsk State Technical University,

Post-Graduate Student of the Department of Automatic Electric Drive and Mechatronics,

e-mail: aleksandr1990makarov@gmail.com