

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РЕАКТОРНОМ ПУСКЕ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Бутаков С.А., Петрякова Е.С., Идрисов И.Н., Лымарь А.Б., Шевченко С.Г.

Аннотация. В статье представлены результаты компьютерного моделирования переходных процессов в асинхронных электроприводах при реализации реакторного способа пуска. Экстремальные воздействия, возникающие при прямом пуске, оказывают негативное влияние на техническое состояние и значительно снижают ресурс асинхронных двигателей. Обоснована необходимость имитационного моделирования электромагнитных и электромеханических пусковых процессов. Приведена структурная и функциональная схема компьютерной модели, реализованной в среде *Matlab*, описаны возможности модели. Приводятся примеры динамических характеристик (механических и электромеханических) высоковольтного асинхронного электропривода в переходных пусковых режимах. Характеристики, полученные с учетом всех значимых особенностей электропривода, являются исходными данными для анализа и поиска режимов управляемого пуска, минимизирующих негативное влияние переходных процессов. На примере реакторного пуска высоковольтного асинхронного электропривода показана возможность выбора пускового режима, ограничивающего негативное влияние колебательной составляющей электромагнитного момента.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, компьютерная модель, прямой пуск, пусковой режим, реакторный пуск.

COMPUTER SIMULATION OF TRANSIENT PROCESSES AT ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVES REACTOR START

Butakov S.A., Petryakova E.S., Idrisov I.N., Lymar A.B., Shevchenko S.G.

Abstract. This paper presents the results of computer simulation of transient processes in an asynchronous electric drives while the implementation of the start reactor method. Extreme effects, which occur in the process of direct start, have a negative effect on the technical condition and significantly reduce the resource of asynchronous motors. The necessity of simulation of electromagnetic and electromechanical starting processes is demonstrated. The structural and functional diagram of the computer model, which was discovered in the Matlab system, was shown. The abilities of the model were described. Examples of dynamic characteristics (mechanical and electromechanical) high-voltage asynchronous electric drive in transient starting conditions were presented. These characteristics, obtained using all the relevant features of the drive are initial data for analysis and search regimes controlled start, minimizing the negative impact of transients. For example, reactor start-up of high-voltage asynchronous electric drive with the possibility of choosing the start mode, limiting the negative impact of the oscillatory component of the electromagnetic torque.

Keywords. Asynchronous motor, computer model, direct start, start mode, reactor start-up.

Актуальность проблемы

Одной из главных проблем при эксплуатации мощных нерегулируемых асинхронных электроприводов является их пуск в работу. Как известно, пусковой ток асинхронного двигателя (АД) может в 5-10 раз превышать номинальное значение. Это создает кратковременную, но значительную нагрузку на сеть электроснабжения и, соответственно, снижение качества электроэнергии. При прямом пуске АД возникает значительный знакопеременный пусковой момент, амплитуда которого может достигать 5-7 номинальных значений. Это приводит к существенным динамическим нагрузкам в механической системе агрегата и таким негативным последствиям как скручивание валов механических передач, удары и разрушения механических соединений, пробуксовке механизмов и др. Колебательная составляющая момента оказывает интенсивное механическое воздействие на обмотку статора. Учитывая совместное действие колебательной составляющей и термическое действие пусковых токов, можно сказать, что каждый пуск АД снижает срок службы изоляции, поскольку её механическая прочность в значительной мере снижается с повышением температуры обмоток [1].

Облегчение условий пуска АД является важной задачей, позволяющей увеличить ресурс двигателя и, в некоторых случаях, экономить электроэнергию. Особенно остро проблема пуска стоит для высоковольтных АД, потребляющих большую мощность из сети и имеющих значительный момент инерции на валу. Для таких двигателей до 80 % всех неисправностей обусловлены негативным воздействием переходных пусковых процессов [2, 3]. Число прямых пусков таких двигателей ограничено, поэтому часто, при простоях в технологическом процессе, двигатели оставляют в работе, что приводит к неоправданному расходу электроэнергии. Эта проблема типична для насосных и воздуходувных станций, в которых несколько турбоагрегатов работают параллельно на общую сеть [2].

Пуск, при котором нейтрализуется негативное влияние переходных процессов, называют «мягким» (*soft-start*) или «плавным».

Возможны следующие способы мягкого пуска АД: пуск с использованием преобразователя частоты (ПЧ); пуск с использованием тиристорного регулятора напряжения (ТРН); пуск с переключением обмоток со «звезды» на «треугольник»; реакторный пуск; автотрансформаторный пуск.

Эти способы неравнозначны как по степени снижения негативного влияния переходных процессов, так и по объемам материальных затрат, требуемых на их внедрение.

Выбор эффективного и экономически оправданного способа мягкого пуска представляет собой задачу, решение которой требует учета всех особенностей работы электроприводов в каждом конкретном случае. К таким особенностям относятся: характеристики двигателя, вид нагрузки на валу, мощность питающей сети, допустимое время пуска, условия эксплуатации и другие характеристики.

Для выбранного способа пуска важным является определение оптимального пускового режима по критерию минимума негативного влияния переходных процессов. В зависимости от условий эксплуатации, таким критерием может быть минимум тепловых потерь в двигателе или минимум размаха начального значения колебательной составляющей электромагнитного момента. Пусковым режимом при пуске с помощью тиристорного регулятора напряжения является закон изменения напряжения, подводимого к двигателю. Для реакторного пуска и пуска с переключением обмоток это время переключения на сеть и время переключения со «звезды» на «треугольник» соответственно.

Модель переходных процессов

Наиболее приемлемым способом поиска оптимальных пусковых режимов является метод компьютерного моделирования. Соответствующие имитационные модели реализуются на языках программирования высокого уровня [4]. Однако такой подход требует высокой квалификации программиста, значительного времени для создания модели и обработки результатов.

Существенно упрощает задачу использование специализированных пакетов. Большими возможностями для создания компьютерной модели обладает пакет *Matlab*. Расширение *Simulink* этого пакета имеет библиотеки виртуальных электрических машин, силовой электроники, источников энергии, измерительных приборов. Это позволяет быстро сконструировать и исследовать модель практически любой сложности. При отсутствии в составе библиотек необходимых элементов они могут быть построены из элементарных блоков *Simulink*. Библиотечная модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в *Simulink* основана на известной Т-образной схеме замещения и описывающей её системе дифференциальных уравнений [5].

Из перечисленных ранее способов пуска наиболее эффективными с точки зрения подавления колебательной составляющей момента является пуск с помощью ПЧ и пуск с помощью ТРН. Однако, стоимость таких пусковых устройств продолжает оставаться высокой,

что препятствует их массовому применению. Так, для мощных высоковольтных асинхронных электроприводов срок окупаемости ПЧ может превышать срок их службы [6].

В этих условиях продолжает оставаться актуальной простой в реализации и относительно недорогой реакторный пуск, упрощенная схема которого приведена на рис. 1.

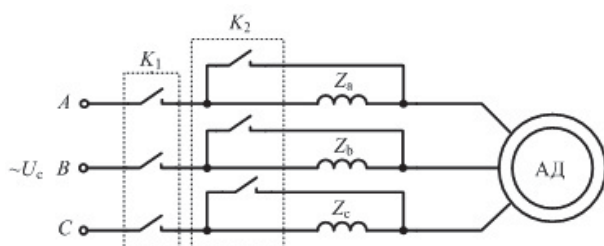


Рис. 1. Схема реакторного пуска

Реакторный пуск является двух ступенчатым. Сначала замыкается коммутатор K_1 и двигатель подключается к сети через реакторы Z_a , Z_b , Z_c . После разгона двигателя до некоторой скорости замыкается коммутатор K_2 , и двигатель оказывается напрямую подключенным

к сети. Такой способ позволяет уменьшить бросок тока при пуске, снизить кратность пускового тока первой ступени и начальную амплитуду колебательной составляющей момента.

Степень снижения негативного влияния пускового процесса для данного двигателя определяется двумя основными факторами: электрическими характеристиками реактора и временем переключения коммутатора K_2 .

Методика расчета электрических характеристик реактора изложена в специальной литературе [7, 8]. Если пусковой ток необходимо снизить в p раз, то полное сопротивление реактора в простейшем случае может быть рассчитано по формуле [7]:

$$Z_p = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_n} \cdot \frac{p-1}{k_i};$$

где U_n, I_n – номинальные напряжение и ток двигателя; $k_i = I_{пуск}/I_n$ – паспортное значение кратности пускового тока двигателя.

Более подробно расчет пусковых реакторов описан в работе [8]. Вопросы рациональных соотношений между активным и индуктивным сопротивлением реактора, их связи с характеристиками двигателя, продолжительности работы реактора являются предметом отдельных исследований.

Для анализа реакторного пуска и поиска оптимальных пусковых режимов в среде *Matlab* была создана компьютерная модель, структура которой показана на рис. 2.

Блок моделирования пускового устройства позволяет задать характеристики реактора, т. е. его активное и индуктивное сопротивление. Блок управления и коммутации определяет закон управления пусковым устройством, т. е. режим пуска. Блок измерений обеспечивает отображение и запись всех требуемых параметров. Блок моделирования нагрузки позволяет задать характер момента на валу асинхронного двигателя.

Функциональная схема компьютерной модели, реализованная в расширении *Simulink*, приведена на рис. 3. Блоки «*Speed*», «*Moment*», и «*Current*» записывают в память массивы данных скорости, момента и тока двигателя соответственно.

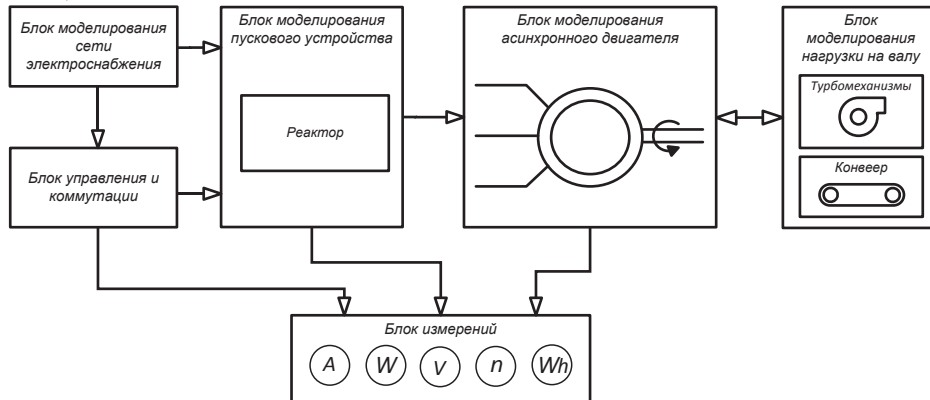


Рис. 2. Структурная схема компьютерной модели

Модель имеет следующие возможности: возможность задания характеристик сети, характера нагрузки на валу двигателя, характеристик реактора; изменение времени переключения на сеть; получение расчетных осциллограмм мгновенных или действующих значений токов статорных обмоток, частоты вращения вала и электромагнитного момента двигателя; измерение токов, напряжений, активной, реактивной и полной мощности всех электрических элементов модели; измерение момента и скорости двигателя, механической мощности на валу; получение графической динамической механической и электромеханической характеристик двигателя; получение численных массивов данных, отражающих исследуемые пусковые процессы.

Исходными данными для анализа пусковых режимов выступают расчетные осциллограммы фазных токов, скорости и электромагнитного момента двигателя. Наиболее информативными для специалистов являются динамические механическая электромеханическая характеристики двигателя, которые отображаются виртуальными графопостроителями.

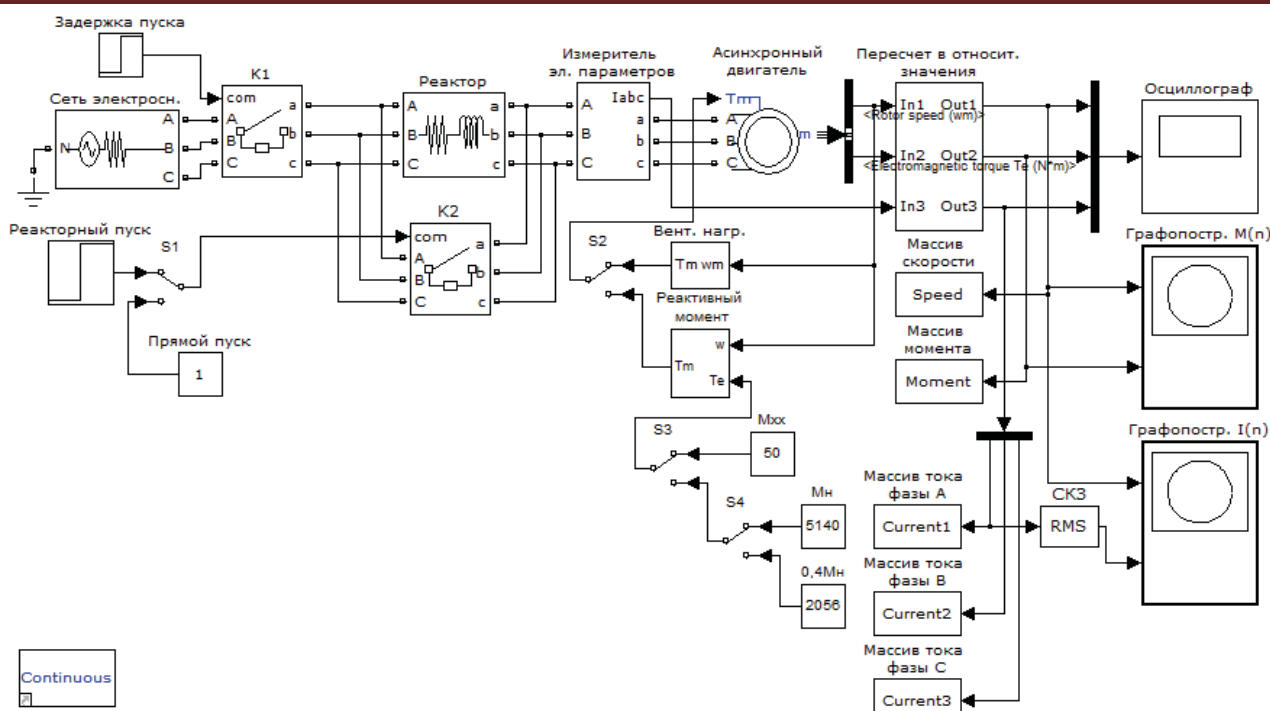


Рис. 3. Функциональная схема компьютерной модели

Результаты моделирования

В качестве примера результата работы модели на рис. 4 приведена расчётная зависимость изменений основных координат мощного высоковольтного асинхронного двигателя (6000 В, 800 кВт) от времени. Для оценки негативного влияния колебательной составляющей электромагнитного момента в простейшем случае могут использоваться пиковые (ударные) значения момента на первой или второй ступени пуска. Более наглядным параметром является кратность размаха начального значения колебательной составляющей момента. Размах начального значения электромагнитного момента k_1 при нулевых начальных условиях однозначно определяется параметрами реактора. Характер колебательного процесса и величина размаха k_2 второй ступени существенно зависит от момента коммутации.

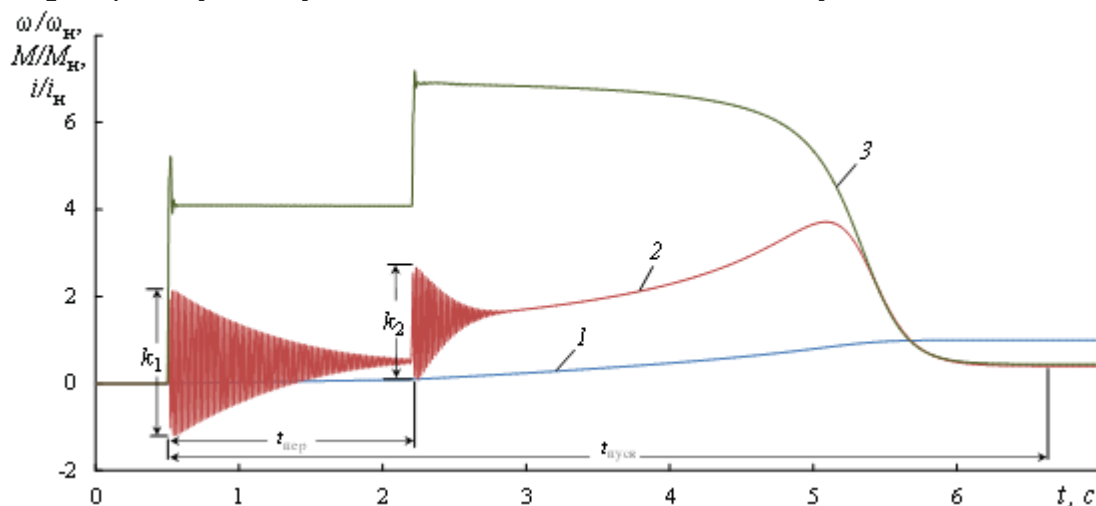


Рис. 4. Расчётная осциллограмма электромагнитного момента при реакторном пуске: 1 – скорость двигателя; 2 – электромагнитный момент; 3 – ток статора двигателя

На рис.4 введены обозначения: $t_{пер}$ – время переключения на сеть; $t_{пуск}$ – время пуска; k_1 – кратность размаха момента первой ступени пуска; k_2 – кратность размаха момента второй ступени пуска; ω – угловая скорость, c^{-1} ; ω_n – номинальная угловая скорость, c^{-1} ; M – электромагнитный момент двигателя (н·м); i – ток статора (А); i_n – номинальный ток двигателя (А).

Величина k_2 может быть как меньше, так и значительно больше k_1 , что видно из графиков на рис. 5. Правильный выбор времени переключения является особенно важным, поскольку он является единственным управляемым параметром при реакторном пуске.

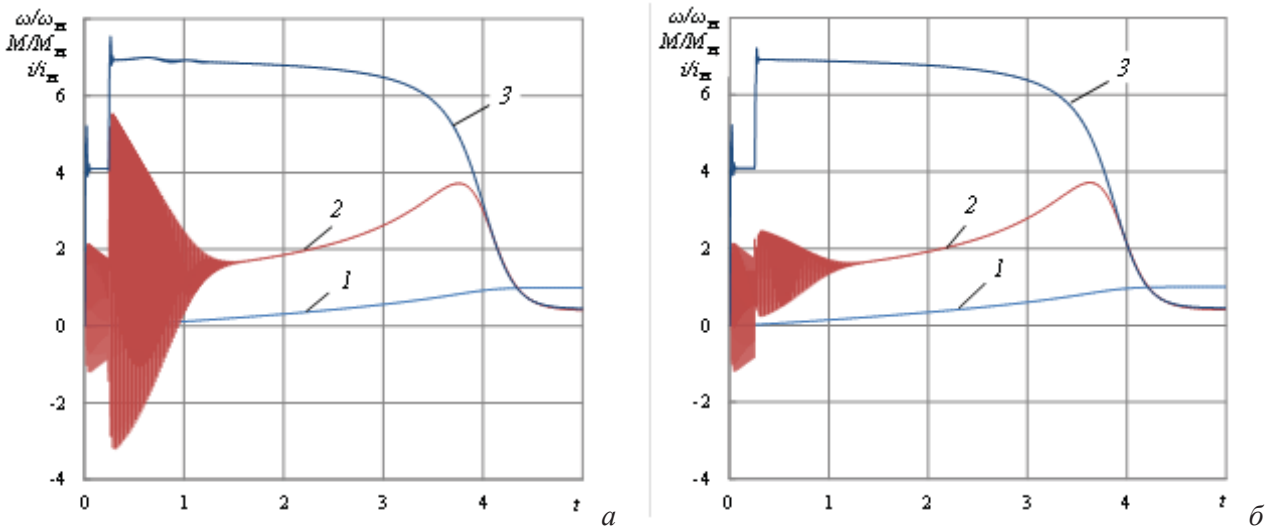


Рис. 5. Расчетные осциллограммы реакторного пуска при $t_{пер}=0,241$ с (а) и $t_{пер}=0,253$ с (б):

1 – скорость двигателя; 2 – электромагнитный момент; 3 – ток статора двигателя

Для минимизации величины k_2 рекомендуется выбирать время переключения на сеть при скорости двигателя, близкой к номинальному значению. Однако в этом случае пуск становится затяжным и тепловые потери в двигателе достаточно велики. Поэтому необходим поиск такого значения $t_{пер}$ при котором величина колебательной составляющей момента второй ступени оказывает минимальное негативное влияние на двигатель, а тепловые потери находятся в допустимых пределах.

Преимущество реакторного пуска перед прямым отчетливо видно на рис. 6. Как уже отмечалось, степень снижения амплитуды колебательной составляющей не одинакова для различных значений времени переключения и при малых $t_{пер}$ может меняться в большом диапазоне. При неудачном выборе времени переключения реакторный пуск по степени негативного влияния на двигатель может быть соизмерим с прямым пуском.

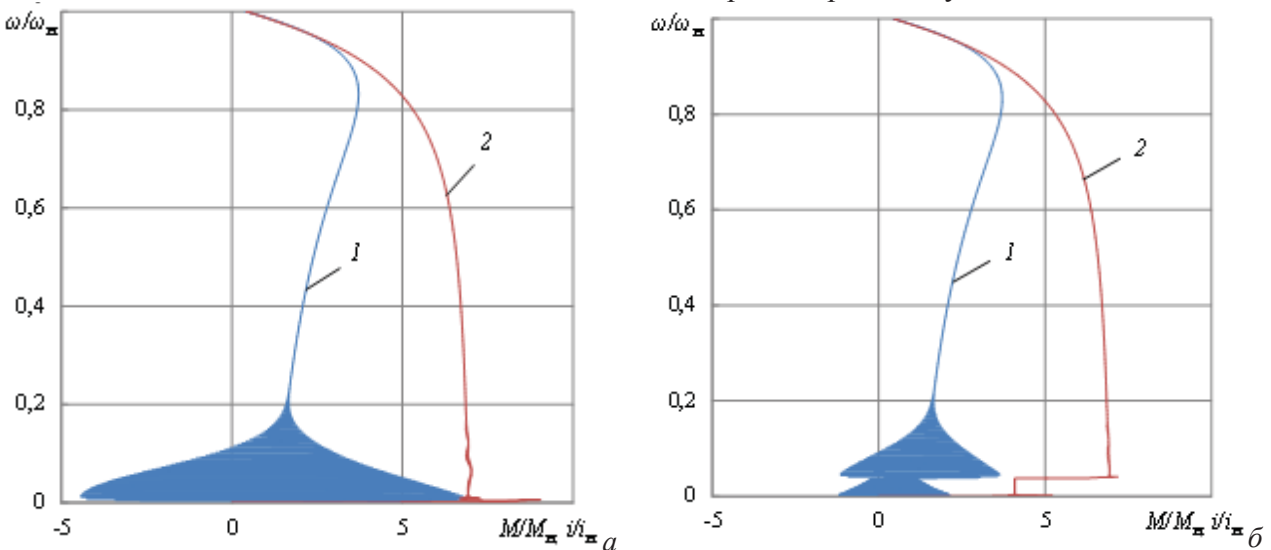


Рис. 6. Расчетные динамические характеристики при прямом (а) и реакторном (б) пуске:

1 – механическая; 2 – электромеханическая

Сравнивая динамические характеристики различных пусковых режимов, можно выбрать из них такие, которые соответствуют минимальным динамическим нагрузкам. Задача снижения динамических нагрузок может быть решена путем формирования пусковой динамической характеристики, которая в наибольшей степени будет приближена к статической характеристике, то есть ограничением или полным подавлением колебательной составляющей

щей электромагнитного момента. В источнике [8] рекомендуется выбирать, такие режимы, при которых пиковые значения момента не превышают 0,85 максимального момента. В работе [9] качество решения этой задачи оценено на основе более сложных численных критериев, отражающих степень наличия колебательной составляющей. Получаемые с помощью модели массивы численных данных могут быть использованы для расчета таких критериев.

В качестве примера использования данных моделирования рассмотрим график зависимости параметра k_2 от времени переключения $t_{пер}$. График построен по результатам обработки около 9000 расчетных осциллограмм. Пунктиром показана кратность размаха колебательной составляющей первой ступени k_1 .

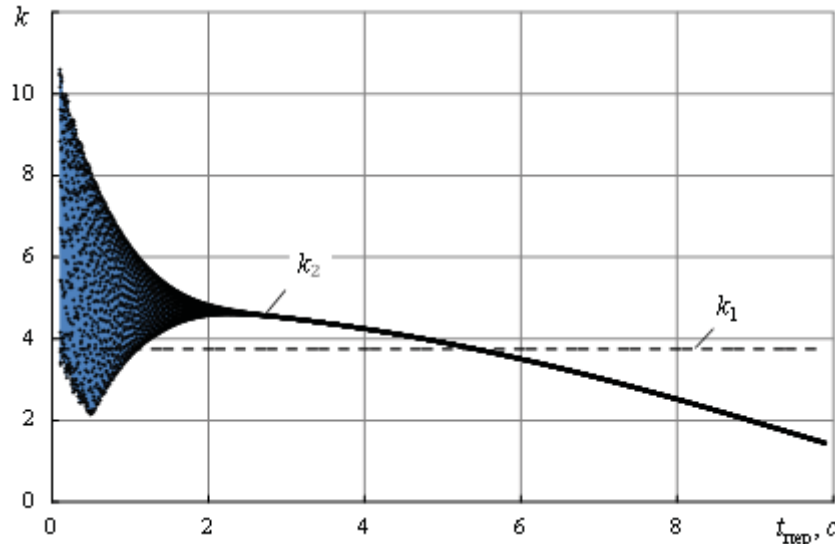


Рис. 7. Зависимость кратности размаха колебательной составляющей момента от времени переключения при реакторном пуске

В области малых значений $t_{пер}$ параметр k_2 подвержен значительным колебаниям с периодом сетевого напряжения, что обусловлено различием в начальных условиях при переключении на сеть. Колебания k_2 убывают по мере увеличения $t_{пер}$ и прекращаются при некотором значении близком к длительности колебательной составляющей момента первой ступени пуска. В дальнейшем k_2 монотонно уменьшается.

Приведенный график показывает, что выбор малых значений $t_{пер}$ нерационален, поскольку в этом случае параметр k_2 может достигать значительных величин и негативное влияние переходных процессов становится соизмеримым с условиями прямого пуска. При этом быстродействия коммутационной аппаратуры недостаточно для переключения двигателя на сеть в моменты времени, соответствующие минимальным значениям k_2 . Если состояние электропривода требует максимального ограничения ударных переходных моментов, то рациональным является выбор значения времени переключения, соответствующего соблюдению условия $k_2 = k_1$. В этом случае негативное влияние колебательной составляющей момента второй ступени пуска не превышает аналогичного влияния первой ступени.

Таким образом, массивы данных, полученных при компьютерном моделировании, позволяют обоснованный выбор времени переключения двигателя на сеть при реакторном пуске.

Заключение

Детальное изучение электромагнитных переходных процессов дает возможность рационально конструировать системы асинхронных электроприводов. Не смотря на то, что многие динамические процессы в электроприводах достаточно хорошо изучены, простейшие способы пуска, такие как реакторный, продолжают оставаться актуальными. Их глубокое исследование позволяет находить пути повышения эффективности соответствующих пусковых устройств.

Описанная компьютерная модель является мощным инструментом для поиска оптимальных режимов реакторного пуска асинхронных двигателей. Она позволяет получать ис-

ходные данные для теоретического анализа пусковых режимов с целью выбора наиболее благоприятных из них с точки зрения минимизации переходных процессов на техническое состояние и ресурс двигателя.

Полученные результаты рекомендуется использовать при создании алгоритмов управления реакторными пусковыми устройствами и реализации энергоэффективного старто-стопного регулирования производительности насосных и воздухоудвухных станций.

Список использованных источников

1. Яманов, С.А. Старение, стойкость и надежность электрической изоляции / С.А. Яманов, Л.В. Яманова – М.: Энергоатомиздат, 1990.–176 с.
2. Уманцев, Р.Б. Конструкции и ремонт короткозамкнутых обмоток роторов крупных двигателей / Р.Б. Уманцев. – Изд. 2-е, перер. и доп. М.: «Энергия», 1976. – 80 с.
3. Иноземцев, Е.К. Ремонт мощных электродвигателей/ Е. К. Иноземцев – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.
4. Макарычев, П.П. / Математическое и алгоритмическое обеспечение программы имитационного моделирования динамических систем / П.П. Макарычев, Е.Б. Захарикова // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2014. – №2(5) – С. 45-54.
5. Krause, P.C. Analysis of Electric Machinery / O. Wasynczuk, S.D. Sudhoff. [Б.м.]: – IEEE Press, 2002.
6. Лезнов, Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздухоудвухных установках / Б.С. Лезнов – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.
7. Карасев, Б.В. Насосные и воздухоудвухные станции: Учеб.для вузов / Б.В. Карасев – Мн.: Выш. шк., 1990. – 326 с.
8. Вешеневский, С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе / С.Н. Вешеневский – Изд. 6-е, исправленное. М. – : «Энергия», 1977.– 432 с.
9. Вечеркин, М.В. Сравнительная оценка способов пуска асинхронных двигателей по колебательной составляющей электромагнитного момента / М.В. Вечеркин, А.С. Сарваров, Е.В. Макаочева, А.В. Макаров : труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводе АЭП-2014. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – Т.1. – С.197-202.
10. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе/ М.М. Соколов [и др.].– М.: «Энергия», 1967. – 200 с.
11. Вечеркин, М.В. / Исследование способов регулирования производительности вентиляторной станции ЛПЦ-10 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» / М.В. Вечеркин, А.С. Сарваров // Известия высших учебных заведений. Электромеханика, 2006. – №4. – С. 63-67.

Бутаков Сергей Анатольевич – канд. пед. наук, доцент кафедры физики ФГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: boutakov@mail.ru.

Петрякова Екатерина Сергеевна – студент, ФГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: petryakova-ekaterina@mail.ru.

Идрисов Ильдар Наильевич – магистрант, ФГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: ildar_nailevich@mail.ru.

Лымарь Алексей Борисович – студент, ФГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: lymar.alexei@mail.ru.

Шевченко Светлана Григорьевна – ст. преп. кафедры физики ФГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Бутаков С.А., Петрякова Е.С., Идрисов И.Н., Лымарь А.Б., Шевченко С.Г. Компьютерное моделирование переходных процессов при реакторном пуске асинхронных электроприводов // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2015. – №1. – С. 9-15.

Butakov, S.A., Petryakova, E.S., Idrisov, I.N., Lymar, A.B. and Shevchenko S.G. (2015). Computer Simulation of transients at reactor start asynchronous electric drives. Software of systems in the industrial and social fields, 5 (1): 9-15.
