

УДК 621.313.223

Романенко Ирина Геннадьевна, Данилов Максим Иванович

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ В ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ

В статье представлена математическая модель двигателя постоянного тока с подчиненной системой регулирования. В разработанном программном комплексе смоделирован пуск двигателя без регулирования параметров и с регулированием. Установлено влияние параметров двигателя на показатели качества регулирования.

Ключевые слова: двигатель постоянного тока, математическая модель, замкнутая система регулирования, показатели качества регулирования, переходной процесс.

Irina Romanenko, Maxim Danilov

SIMULATION OF DC TRACTION ENGINE WITH SEQUENTIAL EXCITATION IN A CLOSED SYSTEM FOR PARAMETER REGULATION

The authors reveal a mathematical model for a DC engine with a subordinate control system. The developed software system contains a model for engine start both without parameter regulation and with that. There has been shown the influence of the engine parameters on the quality of the control.

Key words: DC engine, mathematical model, closed system for regulation, regulation quality indicators, transition process.

Во многих отраслях промышленности, где используют механизмы, предъявляющие высокие требования к перегрузочной способности и требующие плавного регулирования частоты вращения в широком диапазоне, используют вентильный электропривод (ВЭП) постоянного тока. Применение компьютерных технологий для анализа характеристик двигателей, работающих совместно с полупроводниковыми преобразователями и имеющих сложную многоконтурную систему управления, позволяет исследовать переходные электромагнитные и электромеханические процессы в машине, прогнозировать динамические свойства двигателей на стадии их проектирования, оценивать показатели качества процесса регулирования систем с различными способами настройки регуляторов, а также проектировать системы ВЭП с заданными показателями качества регулирования.

Использование компьютерного моделирования предполагает наличие математической модели двигателя.

В настоящей работе представлена модель тягового двигателя постоянного тока последовательного возбуждения, работающего в составе вентильного электропривода с подчиненной системой регулирования параметров.

Предлагаемая модель базируется на уравнениях В. В. Фетисова – Б. В. Сидельникова [1]. Модель учитывает влияние вихревых токов, наводимых в массивных частях магнитопровода при изменении потока, нелинейность магнитной цепи машины по продольной оси, размагничивающее действие поперечной и коммутационной реакции якоря.

При расчете электромеханического переходного процесса модель включает в себя также уравнение движения

$$M_{\text{эм}} = M_{\text{нг}} + M_T + \frac{GD^2}{4} \cdot \frac{d\omega}{dt},$$

где $M_{\text{эм}}$, $M_{\text{нг}}$ – электромагнитный момент и момент нагрузки на валу двигателя, соответственно; M_T – момент, соответствующий потерям в стали, механическим и частично добавочным потерям; GD^2 – маховый момент якоря и присоединенных масс; ω – угловая скорость вращения.

Для реализации указанной математической модели разработан алгоритм (рис. 1) и соответствующее программное обеспечение [2; 3]. В качестве необходимых исходных данных используются технические характеристики, приведенные в паспорте двигателя: номинальная мощность машины, номинальное напряжение, номинальная частота вращения. Ввод исходных данных ведется в режиме диалога ПЭВМ с пользователем.



Рис. 1. Алгоритм моделирования двигателя постоянного тока с подчиненной системой регулирования параметров

Порядок выполнения поверочного расчета приведен в [4].

Расчет параметров схемы замещения производится согласно [5]. Большинство величин, необходимых для определения параметров схемы замещения, находится в ходе поверочного расчета: при определении главных размеров, размеров магнитной цепи, расчете обмотки якоря, обмотки возбуждения, добавочных полюсов и их обмотки, компенсационной обмотки, при расчете коммутационных параметров.

Динамический расчет включает в себя расчет переходных электромагнитных и электромеханических процессов, сопровождающих такие переходные режимы, как пуск, реверс, изменение нагрузки, торможение, на основе математической модели с учетом рассчитанных ранее параметров модели. Решение осуществляется численным методом Рунге – Кутты четвертого порядка.

Некоторые параметры модели, такие как сопротивление короткозамкнутого d -витка r_d , индуктивность намагничивающих контуров по продольной оси L_{md} , являются переменными величинами и не могут быть рассчитаны только по результатам поверочного расчета. Так, r_d является нелинейной функцией тока якоря и частоты вращения, L_{md} определяется как производная полезного потока по суммарной намагничивающей силе по продольной оси и также зависит от тока якоря.

Таким образом, данные параметры определяются в ходе динамического расчета с использованием величин, рассчитанных на промежуточных этапах поверочного расчета, и изменяются в зависимости от определяющих их параметров на каждом шаге расчета.

Цикл динамического расчета сопровождается регулированием показателей качества переходного процесса, основными из которых являются перерегулирование и время переходного процесса.

Алгоритм регулирования параметров основан на базовых принципах функционирования вентильного электропривода с системой с подчиненного регулирования. В разработанном комплексе программ реализована двухконтурная система регулирования параметров с внутренним контуром тока и внешним контуром скорости. Для этого в систему уравнений, включающую в себя уравнение движения и уравнения, описывающие схему замещения самого двигателя, добавляются уравнения регуляторов и уравнения связи.

Уравнение пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора скорости:

$$U_{pc} = U'_{вх} + \frac{1}{T_{ис}} \int U'_{вх} \cdot dt, \quad (1)$$

где $U'_{вх}$ – напряжение на входе регулятора скорости, $T_{ис}$ – постоянная интегрирования регулятора скорости.

Уравнение ПИ регулятора тока:

$$U_{pt} = U''_{вх} + \frac{1}{T_{ит}} \int U''_{вх} \cdot dt, \quad (2)$$

где $U''_{вх}$ – напряжение на входе регулятора тока, $T_{ит}$ – постоянная интегрирования регулятора тока.

Уравнения связи:

$$U'_{вх} = U_3 - k_{ос} \cdot \omega, \quad (3)$$

$$U''_{вх} = U_{pc} - k_{от} \cdot i, \quad (4)$$

где U_3 – напряжение задающего сигнала, $k_{ос}$, $k_{от}$ – коэффициенты обратной связи по скорости и по току, соответственно, ω – скорость вращения, i – ток двигателя.

При этом напряжение, подаваемое на двигатель, представляет собой функциональную зависимость $U = f(U_{pt})$, полученную на основании работы вентильного преобразователя.

Параметры регуляторов $k_{ос}$, $k_{от}$, $T_{ис}$, $T_{ит}$ определяются из условий настройки на технический оптимум [6].

Рисунки 2, 3 наглядно демонстрируют влияние системы регулирования на выходные параметры двигателя, такие как частота вращения, ток якоря. На рис. 2 представлены результаты динамического расчета пуска двигателя ТЭД-3У1 без регулирования параметров (уравнения (1)–(4) не включаются в цикл расчета): кривая 1 – ток якоря, кривая 2 – частота вращения. На рис. 3 представлены результаты динамического расчета пуска двигателя ТЭД-3У1, работающего в составе ВЭП с подчиненным регулированием параметров: кривая 1 – ток якоря, кривая 2 – частота вращения.

Из графиков видно, что время переходного процесса в первом случае больше и составляет порядка 5 с, во втором случае – 1,2 с.

Такой показатель качества, как перерегулирование, определяется по формуле [7]:

$$\sigma = \frac{\omega_{max} - \omega_{уст}}{\omega_{уст}} \cdot 100\%,$$

где ω_{max} , $\omega_{уст}$ – максимальное и установившееся значение скорости вращения соответственно.

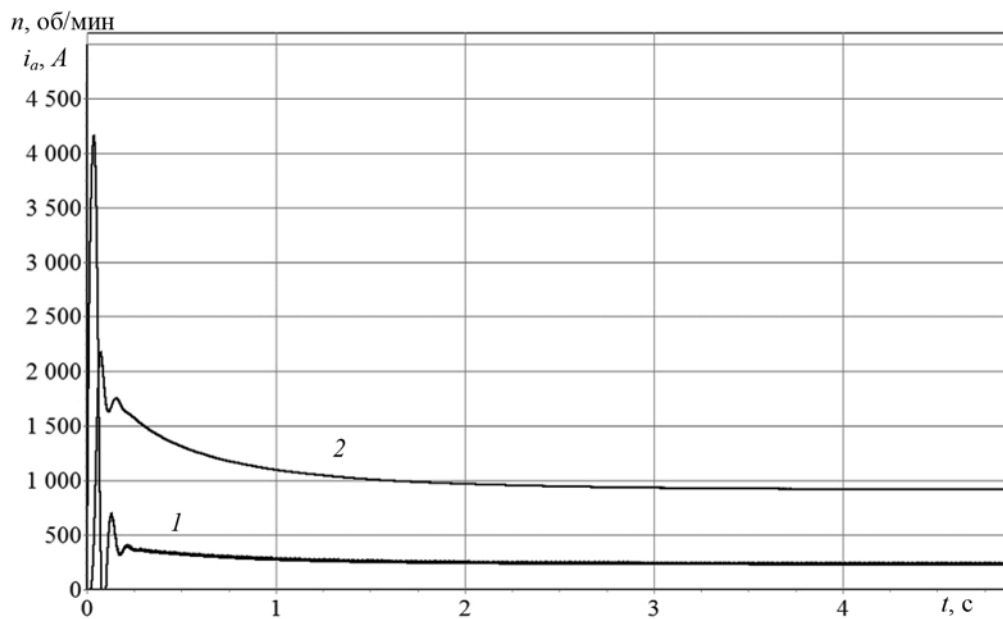


Рис. 2. Результаты моделирования пуска двигателя ТЭД-3У1 без регулирования параметров

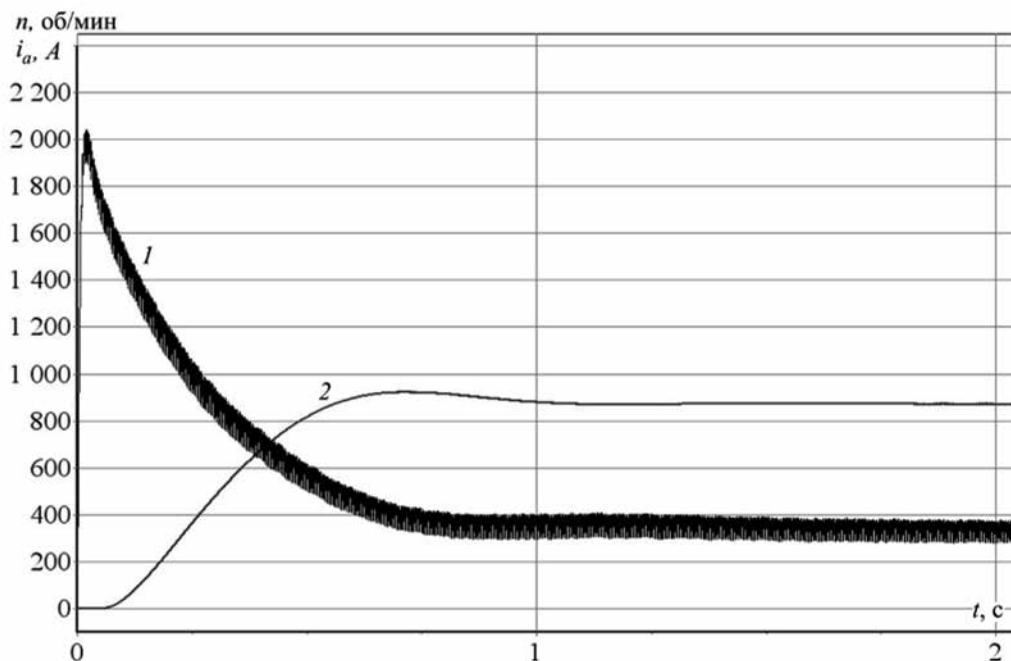


Рис. 3. Результаты моделирования пуска двигателя ТЭД-3У1, работающего в составе ВЭП с подчиненным регулированием параметров

Для расчета пуска двигателя без регулирования параметров перерегулирование составляет 93,5 %, при расчете с регулированием параметров – 6 %.

Рассмотрим влияние параметров модели двигателя ТЭД-3У1, работающего в составе ВЭП с подчиненной системой регулирования, на показатели качества регулирования.

На рис. 4 представлены результаты расчета пуска двигателя: кривая 1 – частота вращения при расчетном сопротивлении якорной цепи, кривая 2 – частота вращения при сопротивлении якорной цепи в 2 раза больше расчетного. Из рисунка видно, что время переходного процесса второй кривой больше, в этом случае оно увеличилось до 2 с, перерегулирование σ при этом составило 1,7 %.

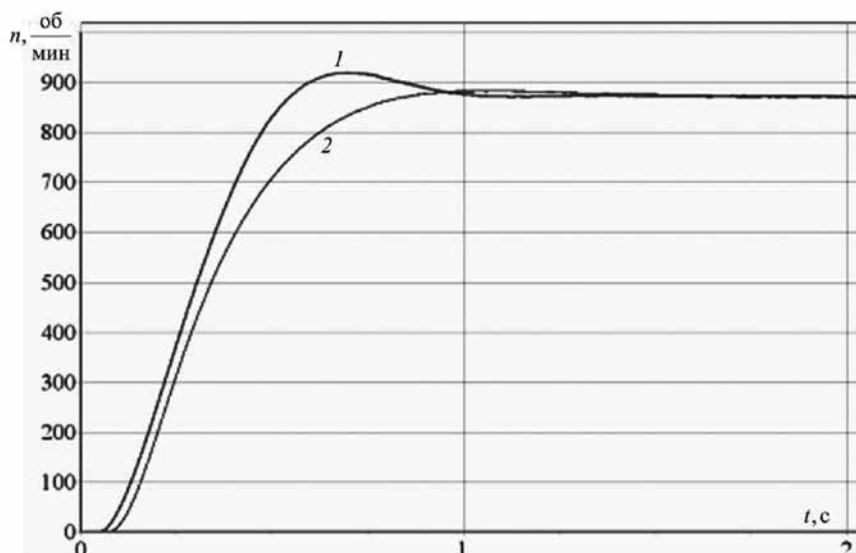


Рис. 4. Результаты моделирования пуска двигателя ТЭД-3У1, работающего в составе ВЭП, при увеличении сопротивления якорной цепи в 2 раза

На рис. 5 представлены результаты расчета пуска двигателя: кривая 1 – частота вращения при расчетном сопротивлении якорной цепи, кривая 2 – частота вращения при сопротивлении якорной цепи в 2 раза меньше расчетного. Время переходного процесса во втором случае составляет порядка 1,1 с, перерегулирование σ при этом составило 9,6 %.

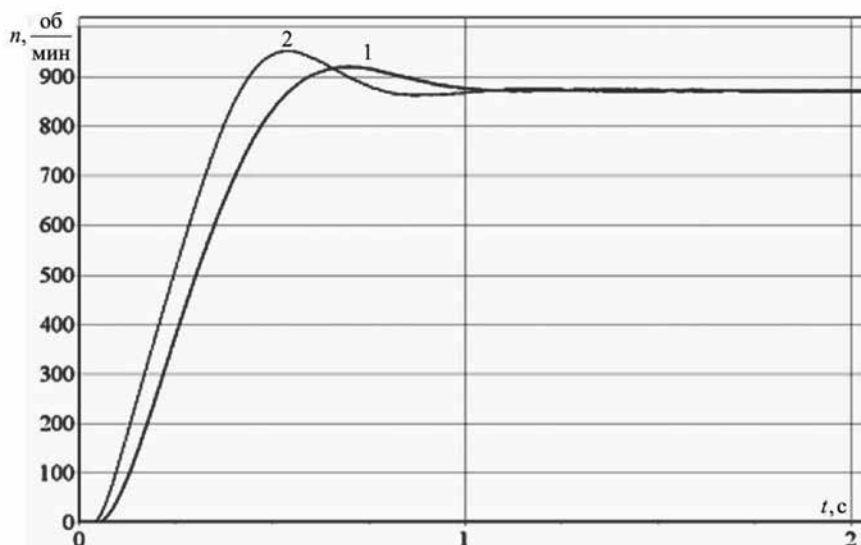


Рис. 5. Результаты моделирования пуска двигателя ТЭД-3У1, работающего в составе ВЭП, при уменьшении сопротивления якорной цепи в 2 раза.

На показатели качества значительное влияние оказывают также индуктивность L_{md} и сопротивление $r_{ов}$: так, при поочередном увеличении этих параметров в 2 раза перерегулирование σ уменьшается до 4 % и 4,3 %, соответственно время регулирования составляет порядка 1,8 с; при поочередном уменьшении этих параметров в 2 раза σ увеличивается до 8,7 % и 7,3 %, соответственно время регулирования меньше 1 с. Влияние остальных параметров значительно меньше.

Другие параметры модели оказывают незначительное влияние на перерегулирование, его изменение составляет не более десятых долей, а иногда и сотых. Результаты расчета перерегулирования, вычисленного в ходе моделирования пуска двигателя ТЭД-3У1, работающего в составе ВЭП с подчиненной системой регулирования, при разных значениях параметров модели приведены в таблице.

Таблица

Зависимость перерегулирования от параметров модели двигателя

Изменяемый параметр	Перерегулирование σ , %	
	При увеличении параметра в 2 раза	При уменьшении параметра в 2 раза
$L_{\sigma q}$	6,0	6,0
L_{mq}	6,0	6,0
L_{md}	4,0	8,7
L_{d1}	6,0	6,1
L_{q1}	6,1	6,1
$L_{d\sigma}$	5,5	6,4
$L_{\sigma в}$	6,2	5,9
$r_{\text{ац}}$	1,7	9,6
$r_{ов}$	4,3	7,3
r_{d1}	6,4	5,4
r_{q1}	6,0	6,0
r_d	6,0	6,1
$r_{ш}$	7,2	4,0

Время переходного процесса при таком изменении параметров модели изменяется в диапазоне от 1 до 2 с: большее изменение времени регулирования соответствует большему отклонению перерегулирования. Причем при увеличении перерегулирования время переходного процесса уменьшается, и наоборот.

Итак, на основе представленной математической модели разработано программное обеспечение, позволяющее исследовать различные режимы работы тягового двигателя постоянного тока в составе ВЭП с подчиненной системой регулирования; с помощью разработанного программного обеспечения был смоделирован пуск тягового двигателя ТЭД-3У1 в составе ВЭП с подчиненной системой регулирования; установлено влияние параметров модели двигателя на такие показатели качества, как перерегулирование и время регулирования.

Литература

1. Владимирова Э. Г. Исследование переходных процессов машин постоянного тока с помощью ЭЦВМ / А. В. Сидельников, Б. В. Сидельников, В. В. Фетисов // Труды ЛПИ. 1969. Вып. 301. С. 103–113.
2. Седова И. Ю., Романенко И. Г. Поверочный расчет двигателя постоянного тока / Свид. о рег. прогр. для ЭВМ № 2007614327. Заяв. 24.07.200., Оpubл. 10.10.2007. М.: ФИПС, 2007.
3. Романенко И. Г., Седова И. Ю. Динамический расчет тягового двигателя постоянного тока / Свид. о рег. прогр. для ЭВМ № 2008610671. Заяв. 19.12.2007. Оpubл. 07.02.2008. М.: ФИПС, 2008.

4. Копылов И. П. Проектирование электрических машин / Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев; под ред. И. П. Копылова. 3-е изд., испр. и доп. М.: Высш. шк., 2002. 757 с.
5. Седова И. Ю., Романенко И. Г. Моделирование динамических режимов тягового двигателя постоянно-го тока // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2008. Т. 4. № 5. С. 19–23.
6. Ключев В. И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 1985. 560 с.
7. Теория автоматического управления. Ч. I. Теория линейных систем автоматического управления / Н. А. Бабаков, А. А. Воронов, А. А. Воронова [и др.]; под ред. А. А. Воронова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1986. 367 с.

УДК 621. 484

**Стоянов Николай Иванович, Смирнова Алла Викторовна,
Смирнова Анастасия Александровна**

ПОВЫШЕНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПЕТРОТЕРМАЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ

В статье представлена новая технология повышения теплоотдачи петротермальной скважины за счет увеличения поверхности контакта теплоносителя с грунтом путем гидравлического разрыва пласта.

Ключевые слова: петротермальная энергия, альтернативная энергетика.

**Nikolay Stoyanov, Alla Smirnova, Anastasia Smirnova
IMPROVING HEAT EMISSION IN PETROTHERMAL WELL**

The authors reveal a new technology to increase heat transfer in petrothermal wells through increasing the contact surface between the coolant and the ground through hydraulic fracturing.

Key words: petrothermal energy, alternative energy.

Возможности использования экологически чистой повсеместно доступной возобновляемой энергии привлекают все большее внимание. В соответствии с прогнозами уже в течение ближайших 15–20 лет возобновляемые источники энергии (энергия Солнца, геотермальная энергия) должны занять заметное место в мировом энергетическом балансе, обеспечивая замещение истощающихся запасов органического топлива и экологическое оздоровление окружающей среды.

Отличием большинства установок возобновляемой энергии от традиционных установок является отсутствие в процессе эксплуатации энергетических затрат на топливообеспечение, что существенно снижает расходную часть. Основными статьями расходов энергии при создании и эксплуатации таких установок являются затраты на производство оборудования и строительство зданий и сооружений. Причем для установок небольшой мощности, строительство каких-либо объектов часто не требуется, поэтому данная статья расходов присутствует не всегда [1–3].

Стратегическими целями использования возобновляемых источников энергии и местных видов топлива являются:

- сокращение потребления невозобновляемых топливно-энергетических ресурсов;
- снижение экологической нагрузки от деятельности топливно-энергетического комплекса;
- обеспечение децентрализованных потребителей и регионов с дальним и сезонным завозом топлива;
- снижение расходов на дальнепривозное топливо [4].