

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПУСКА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СТАРТЕРОМ

*Н.В. Клиначев, С.Г. Воронин, А.И. Согрин, Д.В. Коробатов,
Н.Ю. Кулёва, Г.Т. Хафизов, А.С. Кульмухаметова*

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Составлена и описана совокупность моделей технических устройств и систем управления, необходимая для оценки инженерных задач, которые требуют решения при обновлении существующих систем электростартерного пуска двигателей внутреннего сгорания (ДВС) для дизель-поездов, танков, БМП, судов, мощностью от 0,3 до 1 МВт. Итоговые рекомендации сформулированы в рамках целевой установки на замену стартер-генератора синхронной машиной с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ) и исключение редуктора. Основными затруднениями названы – ограничение прокачиваемой через СДПМ мощности (преодолеваемое комбинированием способов питания секций статора) и момент сопротивления газовых сил двух первых тактов прокручивания коленчатого вала ДВС.

Ключевые слова: безредукторный электропривод, стартер-генератор, моментный двигатель, газовый момент, СДПМ, ДВС, аккумулятор, моделирование в Jigrein4WEB.

Введение

Увеличение энерговооруженности транспортных средств потребовало создания для них более мощных электрических генераторов, а стремление сократить общий объем и массу электрооборудования привело к совмещению функций стартера и генератора в одном устройстве – стартер-генераторе (СТГ). При этом часто используют безредукторную схему соединения СТГ с двигателем внутреннего сгорания (ДВС), так как ротор СТГ может быть установлен вместо маховика (ДВС), а статор – на блоке цилиндров. В результате удастся упростить компоновку ДВС и уменьшить объем аппаратуры [1]. Однако использование безредукторной схемы СТГ связано с затруднениями, обусловленными тем, что, например, у дизельного двигателя, коленчатый вал имеет относительно невысокую скорость вращения, а для запуска дизеля необходимо приложить со стороны СТГ высокий пусковой момент и поддерживать этот момент до определенной скорости вращения коленчатого вала. Учитывая, что запуск двигателя осуществляется от аккумуляторной батареи со стандартным напряжением 28 В, возникает проблема обеспечения электромагнитного момента СТГ в достаточно большом диапазоне скоростей вращения при низком напряжении первичного источника. Решить такую задачу с использованием простейшей схемы питания СТГ от аккумуляторной батареи с постоянным напряжением 28 В без промежуточного преобразования энергии практически не возможно. Кроме того, необходимо учесть, что в режиме пуска ДВС, стартер работает от источника питания примерно одинаковой с ним мощности, с внутренними параметрами, зависящими от температуры, времени хранения, времени работы, тока нагрузки и т. д. Также может оказаться, что хотя интегральная энергия, накопленной в АКБ достаточно для

запуска ДВС, при имеющемся сочетании параметров СТГ и АКБ она за короткое время пуска не может быть передана СТГ. Отсюда возникает проблема выбора функциональной схемы СТГ, включающего электромеханический преобразователь энергии, полупроводниковые устройства преобразования напряжения и аккумуляторную батарею (АКБ). Чтобы ответить на вопрос обеспечит ли выбранная схема СТГ выполнение заявленных функций, необходима по возможности его полная математическая модель, позволяющая исследовать режимы пуска при различных схемах преобразования энергии и сочетаниях параметров элементов этих схем. Кроме того, модель должна учитывать тип электрической машины, ее параметры и способ управления ей в стартерном и генераторном режимах. Задачей настоящей статьи является создание такой модели.

Функциональная схема СТГ

Рассмотрим по возможности полную функциональную схему СТГ как электротехнического комплекса (рис. 1), позволяющего решать вопросы пуска дизельного двигателя и энергообеспечения транспортного средства при различных параметрах и характеристиках ДВС, электромеханического преобразователя (ЭМП) и АКБ. В схему включены электронные преобразователи напряжения (ПН1, ПН2, ПН3) и конденсаторный накопитель энергии (НЭ), облегчающие запуск двигателя, в том случае, когда простейшая схема СТГ [2] с питанием стартера непосредственно от АКБ и прямой передачей энергии от генератора к АКБ по конструктивным, технологическим или физическим причинам не может быть реализована.

Преобразователь ПН1 предназначен для согласования генерируемого напряжения на выходе ЭМП с напряжением АКБ при работе в генератор-

ном режиме и для управления ЭМП в двигательном режиме. Принцип его построения зависит от типа ЭМП. Например, в случае использования классического коллекторного двигателя постоянного тока он представляет собой преобразователь постоянного напряжения в постоянное, работающий либо в реверсивном режиме, либо в одностороннем, если при пуске поток энергии от АКБ к ЭМП не ограничивается. При использовании асинхронного или вентильного двигателя этот преобразователь при потоке энергии от генератора (ЭМП) к АКБ преобразует переменное напряжение с ЭМП в постоянное со стабилизацией его величины. При потоке энергии в обратную сторону он является преобразователем напряжения для питания и управления ЭМП.

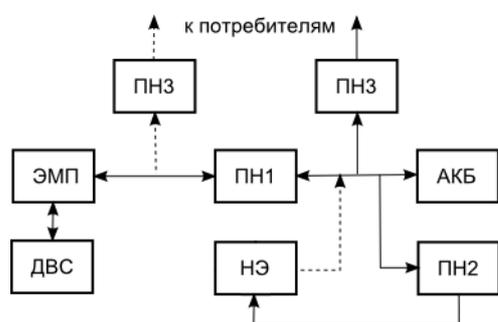


Рис. 1. Функциональная схема СТГ

Накопитель энергии вводится в том случае, когда АКБ недостаточно для уверенного запуска ДВС. Для его заряда используется ПН2. При пуске ДВС ПН1 подключается непосредственно к НЭ (на рис. 1 показано пунктиром). Преобразователь ПН3 предназначен для обеспечения заданного качества напряжения на выходе СТГ. В зависимости от требований он может устанавливаться либо на выходе АКБ, либо на выходе ЭМП (на рис. 1 показано пунктиром).

На основании представленной функциональной схемы составим математическую модель комплекса СТГ, отражающую переходные процессы пуска дизельного двигателя при использовании ЭМП в виде вентильного двигателя и свинцовой АКБ.

Модель свинцовой стартерной аккумуляторной батареи

Параметры модели АКБ [3, 4] характеризуется общими для сернокислотных аккумуляторов паспортными данными [5]: число элементов в АКБ, ЭДС элемента, количество пар пластин в элементе, удельный ток короткого замыкания пары пластин. Структурно она состоит из источника ЭДС с внутренним сопротивлением, значения которых имеют параметрические зависимости от температуры электролита, степени разряженности АКБ [6] и числа попыток пуска.

Начальное разрядное напряжение АКБ определяется выражением [2, 3]

$$U_{xx} = F(2,02 + 0,00136T_0 - 0,001\Delta C_p), \quad (1)$$

где F – число элементов в аккумуляторной батарее; 2,02 – ЭДС одного элемента сернокислотной аккумуляторной батареи при 0°C ; T_0 – температура электролита; ΔC_p – степень разряженности АКБ.

Ток короткого замыкания можно записать в виде [2]

$$I_{вк} = n(I_0 + k_b T_0 - e^{0,0159T_0 - 0,564\Delta C_p} - k_z(z_n - 1) - e^{0,0407T_0 + 0,16(t - 10,0)}(z_n - 1)), \quad (2)$$

где n – количество пар пластин в элементе АКБ (совпадает с количеством сепараторных прокладок); I_0 – удельный ток короткого замыкания одной пары пластин; k_b – коэффициент, учитывающий влияние температуры электролита; k_z – коэффициент, учитывающий влияние числа попыток пуска; z_n – число попыток пуска; t – текущее время.

Для иллюстрации возможностей использования уравнений (1) и (2), для расчета внешних характеристик АКБ (рис. 2) с помощью них был осуществлен виртуальный эксперимент, когда АКБ несколько раз нагружается на идеальный источник ЭДС с программируемым номиналом. Величина источника ЭДС линейно увеличивается от нуля до номинального напряжения батареи. В типовом случае за 3–4 попытки пуска по 10–15 с степень разряженности АКБ меняется несущественно, ЭДС поляризации чуть увеличивается, электролит прогревается.

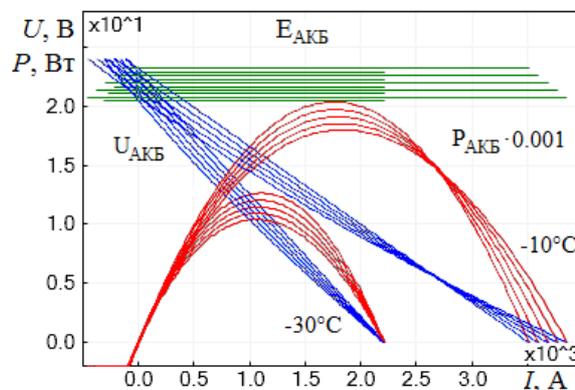


Рис. 2. Семейства внешних характеристик стартерной АКБ, состоящей из четырех аккумуляторов 6СТЭН-140М

Модель пусковой механической характеристики ДВС

В общем случае момент сопротивления вращению ДВС в процессе его запуска можно представить в виде четырех составляющих:

$$M_c = M_{вт} + M_{дин} + M_k + M_{ст}, \quad (4)$$

где обозначено: $M_{вт} = k_{вт}\omega$ – момент вязкого трения, вызванный составляющей, пропорциональной скорости вращения коленчатого вала, $k_{вт}$ – коэффициент вязкого трения, ω – частота вращения коленчатого вала; $M_{дин} = J \cdot d\omega/dt$ – динамический момент, обусловленный ускорением инерционных

масс, J – момент инерции вращающихся и других подвижных частей поршневой группы, приведенный к валу двигателя; $M_{ст} = M_0 \text{sign} \omega$ – момент сухого трения, обусловленный трением колец о стенки цилиндра трением в подшипниках коленчатого вала, которым можно пренебречь, M_0 – модуль момента сухого трения.

Компрессионный момент в уравнении (4) M_k обусловлен сжатием воздуха в цилиндрах неработающего двигателя до начала процесса воспламенения топлива, описывается достаточно сложной системой уравнений [7]. В настоящей статье предложено использовать упрощенную математическую модель, описывающую эту составляющую не так точно, но физически отражающую характер изменения момента сопротивления при вращении коленчатого вала на первом этапе пуска, когда воспламенение еще не происходит. Для этого компрессионный момент представим в виде двух составляющих с относительным значением амплитуды изменения момента 1 и 0,05 ед. Составляющая с меньшей амплитудой описывает характер пульсаций газового момента после двух первых тактов (в установившемся режиме). Ее частота $\Omega = n\omega/2$, где n – число цилиндров, а форму изменения момента приближенно можно принять синусоидальной:

$$\mu_{гз.уст} = 0,05 \sin(\Omega t), \quad (5)$$

Амплитуда этой составляющей в относительных единицах мала, поскольку двигатели конструируют так, чтобы процесс сжатия газа в одном цилиндре уравновешивался расширением газа в другом цилиндре. И, поскольку во время запуска двигателя воспламенение отсутствует, уравновешивание проявляется в максимальной степени.

Составляющая компрессионного момента с большей амплитудой отлична от нуля лишь на двух первых тактах. Точнее – на первых 65 % это-

го интервала, где хорошо аппроксимируется полупериодом синусоиды:

$$\mu'_{гз} = \sin(0,8\omega t), \quad (6)$$

где 0,8 весовой коэффициент, учитывающий то, что половина периода изменения этой составляющей больше π . При значении аргумента в выражении (6) больше π функция принимает нулевое значение.

На рис. 3 в относительных единицах представлены осциллограммы газовых моментов цилиндров запускаемого ДВС, их суммы и аппроксимирующая ее зависимость, построенная по уравнениям (5) и (6). Развертка координат выполнена относительно угла поворота коленчатого вала.

Математическая модель ЭМП

Математическая модель ЭМП будет определяться типом используемого двигателя. В настоящей статье мы рассмотрим случай использования признанного наиболее перспективным в устройствах подобного типа [8] трехфазного вентильного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов (ВД). Как известно, ВД представляет собой органичное сочетание электрической машины и полупроводникового преобразователя, на рис. 1 это ЭМП и ПН1. Принимая во внимание большую инерционность механических процессов пуска ДВС по сравнению с электромагнитными процессами в ВД, будем учитывать влияние последних только на статические характеристики ВД, не учитывая их в динамической модели. Тогда ПН1 можно включить в состав модели ЭМП в виде безынерционного элемента с определенным передаточным коэффициентом.

Питание статорной обмотки ВД может осуществляться различными способами. Это может быть коммутация фазных обмоток с дискретным перемещением результирующего вектора поля

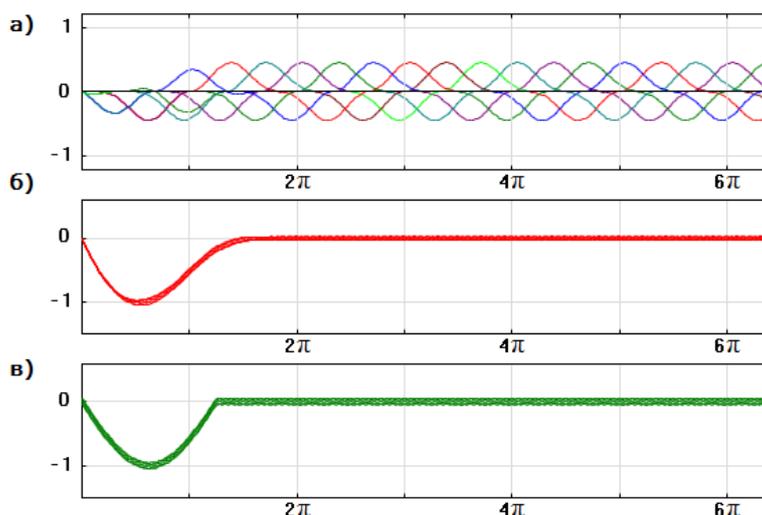


Рис. 3. Осциллограммы газовых моментов цилиндров запускаемого ДВС в относительных единицах (а), их сумма (б) и аппроксимирующая ее зависимость (в)

статора [9], а также позиционная модуляция напряжения или тока с плавным вращением этого вектора, т. е. векторное управление [10]. Каждому из этих способов питания будет соответствовать своя механическая и угловая моментная характеристика, и, соответственно, свои модели.

В настоящее время существует большое количество разнообразных моделей, позволяющих рассчитывать механические и рабочие характеристики ВД с дискретной коммутацией [11, 12]. В данном случае была использована $\alpha\beta$ -модель ВД, входящая в библиотеку моделирующей программы Jigrein4WEB [13], чьи секции статора соединены в звезду и для которой отсутствует возможность определить потенциал нейтральной точки внешним источником. Эта модель ВД, в сравнении с dq-версией, благодаря особенности разностной вычислительной схемы сохраняет устойчивость при большем шаге симуляции и хорошо зарекомендовала себя в моделях электроприводов с питанием секций статора через силовой мост как от источника тока, так и от источника ЭДС

При позиционной модуляции напряжения на фазных обмотках или векторном управлении ВД уравнение тока и момента в относительных единицах запишется выражением [14]

$$i(v) = \mu(v) = (\cos\theta + \zeta \cdot \sin\theta - v) / (1 + \zeta^2). \quad (7)$$

Базовые значения тока и момента определяются по формулам: $I_{\sigma} = 3U_n / (2R_{\phi})$, $M_{\sigma} = I_{\sigma} K_{\phi}$, где K_{ϕ} – коэффициент связи между амплитудой фазной ЭДС и частотой вращения ротора ω ; R_{ϕ} – активное сопротивление фазной обмотки. Кроме того обозначено: v – отношение скорости ротора к скорости идеального холостого хода; $\zeta = \omega L / R_{\phi}$, L_{ϕ} – индуктивность фазной обмотки; θ – угол коммутации, т. е. угол фазового сдвига между ЭДС и напряжением.

Моделирование процесса пуска ДВС при различных вариантах формирования фазного напряжения ВД

На основе приведенных выше уравнений с учетом функциональной схемы СТГ была составлена математическая модель комплекса. В ней принята единая для всех элементов система базовых моментов, токов и скоростей, за которые взяты соответствующие величины, принятые в модели ВД. Для оценки ее работоспособности и удобства использования промоделируем процесс пуска ДВС от реальной АКБ (основные значения параметров АКБ, ДВС и ВД, входящих в состав комплекса, приведены в таблице). В частности, на рис. 4 представлен процесс пуска ДВС при различных способах коммутации трехфазной обмотки ВД:

- дискретная 120-градусная коммутация при угле $\theta = 0$ (кривая 1);
- позиционная модуляция напряжения при $\theta = 0$ (кривая 2);
- векторное управление, когда угол коммутации в процессе пуска изменяется в соответствии с выражением $\theta = \arctg \zeta$ (кривая 3).

Анализируя кривые изменения скорости вращения коленчатого вала $\omega(t)$, можно заключить, что при имеющемся сочетании параметров элементов комплекса разгон до максимальной требуемой для уверенного запуска ДВС скорости ($\omega = 25 \text{ c}^{-1}$) обеспечит только векторное управление ВД.

Использование полученной модели позволяет также сформировать предложения по изменению алгоритма запуска ДВС. Например, если пусковой момент ВД окажется меньше максимального значения компрессионного момента ДВС, стартер не сможет даже повернуть коленчатый вал на первом этапе пуска, что подтверждается результатами моделирования этого процесса (рис. 5, кривая 2).

Параметры устройств, входящих в комплекс СТГ

АКБ 6СТ-90	Удельный ток короткого замыкания одной пары пластин в элементе АКБ, А	222
	Число сепараторных прокладок	10
	Число элементов в батарее (12 В)	6
	Степень разряженности АКБ, %	25
	Температура электролита, °С	-30
ДВС	Номинальная мощность, МВт	1
	Приведенный момент инерции вращающихся масс, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	150
	Число цилиндров	12
	Момент сухого трения (при открытых клапанах), Н·м	50
	Газовый момент двух первых тактов (последующие пульсации – 5%), Н·м	900
Коэффициент вязкого трения, $\text{Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2$	10	
СДПМ	Число фаз (m)	3
	Число пар полюсов (p)	17
	Коэффициент связи между амплитудой ЭДС и частотой вращения ротора (k_e), В/рад/с	0,434
	Момент инерции (J), $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	1,0
	Активное сопротивление фазы (R_{ϕ}), МОм	0,7
Индуктивное сопротивление фазы (L_{ϕ}), мГн	9	

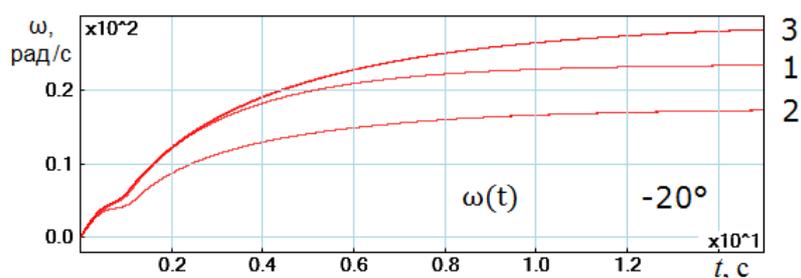


Рис. 4. Переходные процессы раскручивания коленчатого вала ДВС

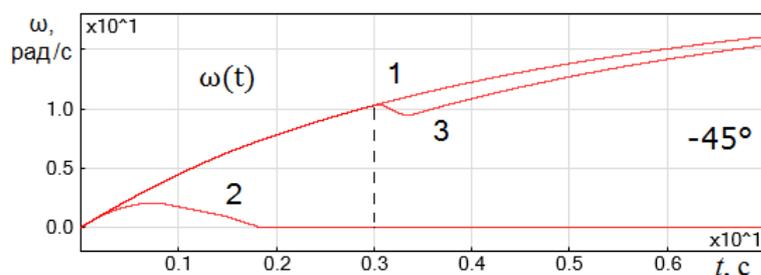


Рис. 5. Раскручивание коленчатого вала ДВС с открытыми клапанами

Но, если мы на первых двух тактах работы двигателя поднимем принудительно клапаны цилиндров, исключив тем самым компрессионный момент и позволив коленчатому валу начать вращение (с изменением скорости в соответствии с кривой 1), то в последующем, после отпущения клапанов в момент времени 3 с, компрессионный момент удастся преодолеть за счет накопленной кинетической энергии вращающихся частей ВД и ДВС и коленчатый вал будет вращаться увеличивая скорость (рис. 5, кривая 3).

Выводы

1. Представленные в статье математические модели оказываются удобными для оценки правильности выбора параметров элементов комплекса СТГ и алгоритмов управления процессом пуска ДВС.

2. Для систем электростартерного пуска ДВС рекомендуется переменный алгоритм коммутации обмотки ВД. На низких оборотах целесообразно использовать 120-градусную дискретную коммутацию (для снижения динамических потерь в ключах). На высоких оборотах предпочтительней оказывается векторное управление, позволяющее увеличить скорость прокручивания.

3. Перспективный способ расширения нижней температурной границы пуска ДВС – раскручивание коленчатого вала с открытыми клапанами и последующим преодолением газовых моментов цилиндров за счет накопленной кинетической энергии маховых масс.

Литература

1. Стартер-генератор для дизельной силовой установки / С.Г. Воронин, А.И. Согрин, П.О. Шабу-

ров, Б.Д. Шумаков // *Электротехника*. – 2013. – № 10. – С. 25–28.

2. Смолин, В.И. Системы электростартерного пуска: учеб. пособие к курсовому и диплом. проектированию для специальности 1808 / В.И. Смолин, Д.В. Топольский, И.Г. Топольская. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – 36 с.

3. The Battery block implements a generic dynamic model parameterized to represent most popular types of rechargeable batteries / Root / SimPowerSystems / Specialized Technology / Electrical Sources and Elements / Battery, Rev.:R2014b // MathWorks inc. web site. – <http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html> (дата обращения: 4.01.2015).

4. Борисевич, А.В. Моделирование литий-ионных аккумуляторов для систем управления батареями: обзор текущего состояния / А.В. Борисевич // *Современная техника и технологии*. – 2014. – № 5. – <http://technology.snauka.ru/2014/05/3542> (дата обращения: 4.01.2015).

5. Дасоян, М.А. Современная теория свинцового аккумулятора / М.А. Дасоян, И.А. Азуф. – Л.: Энергия, 1975. – 312 с.

6. Karthik Kadirvel. Основы измерений заряда аккумулятора / Karthik Kadirvel // *Журнал Радиолоцман*. – 2013. – № 10. – <http://www.rlocman.ru/review/article.html?di=150455> (дата обращения: 4.01.2015).

7. Шишков, В.В. Улучшение показателей рабочего цикла дизеля при пуске подогревом впускного заряда: автореф. ... дис. канд. техн. наук / В.В. Шишков. – Челябинск, 2000. – 22 с.

8. Воронин, С.Г. Векторное управление синхронными двигателями с возбуждением от по-

стоянных магнитов / С.Г. Воронин, Д.А. Курносков, А.С. Кульмухаметова // *Электротехника*. – 2013. – № 10. – С. 50–54.

9. Zhu, Z.Q. Comparison of Torque-speed Characteristics of Interior-magnet Machines in Brushless AC and DC Modes for EV/HEV Applications / Z.Q. Zhu, Y.F. Shi, D. Howe. // *Journal of Asian Electric Vehicles*. – 2006. – Vol. 4, no. 1. – P. 843–850. – https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaev/4/1/4_1_843/pdf (дата обращения: 15.02.2015). DOI: 10.4130/jaev.4.843

10. Paulus, D. Sensorless control of synchronous machines based on direct speed and position estimation in polar stator-current coordinates / D. Paulus, J.-F. Stumper, R. Kennel // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2013. – No. 28 (5). – Art. no. 6257501. – P. 2503–2513. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2211384

11. Кондратьев, А.Б. Исследование механического модуля привода с трехфазным вентильным двигателем при 180-градусном управлении / А.Б. Кондратьев, А.В. Кривилев, А.В. Ситникова // *Электронный журнал «Труды МАИ»*. – 2012. –

№ 50. – <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=28825> (дата обращения: 25.10.2014).

12. Васильев, Л.А. Синтез характеристик вентильного реактивного привода с микропроцессорным управлением / Л.А. Васильев, Ю.В. Мнускин // *Зб. Наукових праць ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і електроенергетика»*. 2001. – Вип. 28. – С. 89–93. – <http://etf.donntu.edu.ua/em/science/articles/Синтез%20характеристик.pdf> (дата обращения: 25.10.2014).

13. Клиначев, Н.В. Естественные механические характеристики синхронного (вентильного) двигателя. Мастер приведения параметров электрических машин. 2013–2014 гг. / Н.В. Клиначев // *Моделирующая программа Jigrein: Теория, программа, руководство, модели*. – 2006–2014 гг. – http://model.exponenta.ru/k2/Jigrein/dcs_20131127.htm (дата обращения: 20.09.2014).

14. Воронин, С.Г. Электропривод летательных аппаратов: конспект лекций. / С.Г. Воронин – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – Ч. 2. – 115 с.

Клиначев Николай Васильевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика и электромеханические системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; klinacherv_nv@mail.ru.

Воронин Сергей Григорьевич, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Электромеханика и электромеханические системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; voroninsg@susu.ac.ru.

Согрин Андрей Игоревич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика и электромеханические системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; sogrinai@susu.ac.ru.

Коробатов Денис Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика и электромеханические системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; denis_vk@inbox.ru.

Кулёва Надежда Юрьевна, аспирант, кафедра «Электромеханика и электромеханические системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; nadezhda.kuleva@mail.ru.

Хафизов Глеб Тагирович, аспирант, кафедра «Электромеханика и электромеханические системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; bloodnighthorror@mail.ru.

Кульмухаметова Александра Сериковна, ассистент кафедры «Электромеханика и электромеханические системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; kulmukhametovaas@susu.ac.ru.

Поступила в редакцию 25 октября 2014 г.

MODELING OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE START WITH ELECTRIC STARTER

N.V. Klinachev, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, klinacherv_nv@mail.ru,
S.G. Voronin, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, voroninsg@susu.ac.ru,
A.I. Sogrin, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, sogrinai@susu.ac.ru,
D.V. Korobotov, Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, denis_vk@inbox.ru,
N.Yu. Kuleva, Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, nadezhda.kuleva@mail.ru,
G.T. Khafizov, Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, bloodnighthorror@mail.ru,
A.S. Kulmukhametova, Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
kulmukhametovaas@susu.ac.ru

We composed and described the set of models of technical devices and control systems which is necessary for evaluation of engineering tasks that require solution with upgrade of the existing systems of electric start of internal combustion engines (ICE) for: diesel multiple unit trains, tanks, infantry fighting vehicles, vessels – with the power from 0.3 to 1 MW. Resulting recommendations are shaped for the purpose of replacement of the starter-generator with the permanent magnet synchronous motor (PMSM) and reduction gear exclusion. The major difficulties are limited power flowing through the PMSM (which is overcome with combined ways of stator section power supply) and the torque of impedance of power forces of two first strokes of the ICE crankshaft turning.

Keywords: non-geared electric drive, starter-generator, torque motor, gas torque, PMSM, ICE, accumulator, modeling in Jigrein4WEB.

References

1. Voronin S.G., Sogrin A.I., Shaburov P.O., Shumakov B.D. A starter-Generator for a Diesel Power Plant. *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol. 84, issue 10, pp. 556–559. DOI: 10.3103/S1068371213100118
2. Smolin V.I., Topol'skiy D.V., Topol'skaya I.G. *Sistemy elektrostarternogo puska* [Electric starter system]. Chelyabinsk, South Ural State University Publ., 2002. 36 p.
3. The Battery Block Implements a Generic Dynamic Model Parameterized to Represent Most Popular Types of Rechargeable Batteries / Root / SimPowerSystems / Specialized Technology / Electrical Sources and Elements / Battery, Rev.:R2014b // MathWorks inc. web site. Available at: <http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html> (accessed 4.01.2015).
4. Borisevich A.V. [Modelling of Lithium-Ion Batteries for Battery Management Systems: a Review of the Current State]. *Modern technics and technologies*, 2014, no. 5. Available at: <http://technology.snauka.ru/2014/05/3542> (accessed 4.01.2015). (in Russ.)
5. Dasoyan M.A., Aguf I.A. *Sovremennaya teoriya svintsovogo akkumulyatora* [The Modern Theory of Lead Battery]. Leningrad, Energiya Publ., 1975. 312 p.
6. Karthik Kadirvel. [Fundamentals of Measurement battery charge]. *RadioLotsman*, 2013, no. 10. Available at: <http://www.rlocman.ru/review/article.html?di=150455> (accessed 4.01.2015). (in Russ.)
7. Shishkov V.V. *Uluchshenie pokazateley rabocheho tsikla dizelya pri puske podogrevom vpusknogo zaryada* [The Improvement in the Operating Cycle of a Diesel Engine at Start Heating the Intake Charge]. Chelyabinsk, South Ural State University Publ., 2000. 22 p.
8. Voronin S.G., Kurnosov D.A., Kul'mukhametova A.S. Vector control of Permanent-Magnet Synchronous Motors. *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol. 84, issue 10, pp. 581–585. DOI: 10.3103/S106837121310012X.
9. Zhu Z.Q., Shi Y.F., Howe D. Comparison of Torque-Speed Characteristics of Interior-Magnet Machines in Brushless AC and DC Modes for EV/HEV Applications. *Journal of Asian Electric Vehicles*, 2006, vol. 4, no. 1, pp. 843–850. Available at: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaev/4/1/4_1_843/_pdf. 15.02.2015). DOI: 10.4130/jaev.4.843
10. Paulus D., Stumper J.-F., Kennel R. Sensorless Control of Synchronous Machines Based on Direct Speed and Position Estimation in Polar stator-Current Coordinates. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, no. 28 (5), art. no. 6257501, pp. 2503–2513. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2211384
11. Kondrat'ev A.B., Krivilyov A.V., Sitnikova A.V. Investigation of Mechatronic Module of Drive with Three-Phase Brushless Motor and 180-Degree Commutation Method. *Trudy MAI*, 2012, no. 50. Available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=28825> (accessed 25.10.2014). (in Russ.)

12. Vasil'ev L.A., Mnuskin Yu.V [Synthesis of the Characteristics of Switched Reluctance Drive with Microprocessor Control]. *Zb. Naukovikh prats' DonNTU. Ser. Elektrotehnika i elektroenergetika*, 2001, vol. 28, pp. 89–93. Available at: <http://etf.donntu.edu.ua/em/science/articles/Синтез%20характеристик.pdf> (accessed 25.10.2014). (in Ukr.)

13. Klinachev N.V. [Natural Simultaneous Mechanical Characteristics (Valve) of the Engine. Master Bring the Parameters of Electrical Machines]. *The simulator Jigrein: Theory, program management, model*. 2006–2014. Available at: http://model.exponenta.ru/k2/Jigrein/dcs_20131127.htm (accessed: 20.09.2014). (in Russ.)

14. Voronin S.G. *Elektroprivod letatel'nykh apparatov: Konspekt lektsiy* [The Electric Drive of Aircraft: Lecture Notes]. Chelyabinsk, South Ural State University Publ., 2008, part 2. 115 p.

Received 25 October 2014

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Моделирование процесса пуска двигателя внутреннего сгорания электрическим стартером / Н.В. Клиначев, С.Г. Воронин, А.И. Согрин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 49–56. DOI: 10.14529/power150207

REFERENCE TO ARTICLE

Klinachev N.V., Voronin S.G., Sogrin A.I., Korobatov D.V., Kuleva N.Yu., Khafizov G.T., Kulmukhametova A.S. Modeling of Internal Combustion Engine Start with Electric Starter. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 49–56. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150207