

Исследование нетрадиционных источников тока в системах электростартерного пуска двигателей внутреннего сгорания

к.т.н. доц. Малеев Р.А., Шматков Ю.М.
Университет машиностроения
8 (495) 223-05-23, доб. 1574

Аннотация. В статье приведены результаты экспериментальных исследований системы электростартерного пуска с аккумуляторными батареями и емкостными накопителями энергии различных типов для двигателей внутреннего сгорания. Проведена оценка эффективности систем электростартерного пуска при использовании накопителей энергии в условиях низких температур.

Ключевые слова: система электростартерного пуска, накопитель энергии, аккумуляторная батарея, двигатель внутреннего сгорания.

Анализ состояния и развития систем электростартерного пуска (СЭП) показывает, что на их выходные параметры оказывают влияние электрические и механические потери, конструкция приводного механизма, режим работы стартера [1]. Существующие конструктивные и технологические меры совершенствования указанных факторов достигли оптимальных значений, и улучшить выходные параметры СЭП за счет их изменения не представляется возможным.

В результате анализа состояния и развития нетрадиционных источников энергии выявлено, что в качестве перспективного источника превосходящего по удельной мощности аккумуляторные батареи (АБ) и способного обеспечить энергией СЭП при температурах до минус 50°C, с учетом требований готовности могут быть рекомендованы низковольтные емкостные накопители электрической энергии, разработанные предприятиями России. Использование СЭП с накопителями энергии (НЭ) дает возможность сохранить номинальное напряжение автомобиля и применять низковольтные НЭ как на перспективных, так и на серийных автомобильных двигателях практически без доработки элементов СЭП [2].

На основании вышеизложенного, задача исследования СЭП с АБ и НЭ заключается в:

- разработке математического описания, программы и методики исследования процесса прокручивания двигателя стартером при использовании АБ и НЭ;
- проведении анализа режимов работы различных вариантов СЭП с целью определения рациональной структуры блока (АБ – НЭ);
- разработке измерительного комплекса на базе климатической камеры и тормозной установки для проведения экспериментальных исследований СЭП с НЭ в условиях низких температур;
- проведении экспериментальных исследований эффективности СЭП с НЭ на тормозной установке в режимах, соответствующих температурам до - 50°C;
- разработке и изготовлении стенда на базе двигателя КамАЗ-740, схемы управления двигателем и элементами СЭП с возможностью сочетания емкости НЭ и АБ.

На первом этапе определения основных параметров НЭ и АБ положен принцип сохранения суммарного объема источников энергии, с учетом существующих на сегодня габаритных размеров аккумуляторных батарей.

Для пуска дизельных двигателей с рабочим объемом цилиндров более 10л применяются АБ типа 6СТ-190 или другие типы АБ с такими же габаритными размерами (6СТ-140, 12СТ-70, 12СТ-85). Для пуска двигателей меньшего литража используются АБ типа 6СТ-110А или вдвое большее количество АБ типа 6СТ-55.

Освободившаяся в результате замены АБ часть объема позволит определить размеры НЭ, размещаемого в штатном объеме совместно с АБ меньшей емкости. Основные электрические параметры НЭ: запасаемая энергия и емкость, определяются исходя из полученного объема НЭ и удельного электрического показателя (энергии на единицу объема). Анализ выпускаемых различными организациями НЭ показал, что может быть достигнут уровень 6 кДж/л. Это значение можно принять для дальнейших расчетов.

Полученные в результате предварительного расчета основные параметры НЭ приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Предварительные значения основных параметров НЭ

№ п/п	Параметр	1 тип	2 тип	3 тип
1	Номинальное напряжение, В	12	24	24
2	Диапазон рабочих напряжений, В	10,8-15	21,6-30	21,6-30
3	Запасаемая энергия при номинальном напряжении, кДж	20	70	140
4	Емкость, Ф	280	240	480
5	Габаритные размеры, мм			
	Длина	150	230	460
	Ширина	180	210	210
	Высота	180	240	240
6	Объем, л	4,86	11,6	23
7	Масса, кг	12,5	23	46
8	Удельная энергия, кДж/л	4,1	6	6

Результаты испытаний показали, что процесс прокручивания двигателя (на примере КамАЗ-740) электростартером при питании его от НЭ существенно отличается от процесса прокручивания при питании СЭП от АБ и характеризуется, прежде всего, отсутствием этапов прокручивания с постоянной средней частотой вращения, однако большую часть времени прокручивание происходит с постоянным средним моментом сопротивления вращению и крутящим моментом, а следовательно и током стартера. При этом напряжение НЭ и частота вращения линейно уменьшается по времени. При создании упрощенной модели СЭП с НЭ было принято допущение о том, что в процессе прокручивания коленчатый вал ДВС нагружен постоянным статистическим моментом сопротивления. Не учитывается также момент инерции системы стартер-ДВС, неравномерность вращения коленчатого вала, индуктивность стартерной цепи и изменение магнитного потока стартерного электродвигателя.

Минимальная пусковая частота вращения конкретного двигателя непостоянна и увеличивается с понижением температуры окружающего воздуха и ДВС. Использование средств облегчения пуска приводит к снижению минимальной пусковой частоты вращения. Следует заметить, что увеличение частоты прокручивания приводит к уменьшению продолжительности пуска. По стандарту продолжительность пуска дизельного двигателя принимается равной 15с, что обусловлено мощностными возможностями АБ при предельной температуре надежного пуска холодного двигателя. Применение НЭ позволяет увеличить пусковую мощность, но в течение ограниченного времени, так как запас энергии накопителя значительно меньше, чем АБ. Поэтому следует исследовать режим пуска двигателя при более высоких частотах прокручивания с меньшей продолжительностью, т.е. в режимах, которые может обеспечить НЭ [3].

Результаты расчета показали, что для пуска двигателя КамАЗ-740 при температуре минус 12⁰С требуется НЭ емкостью 637Ф. При этом пуск может быть осуществлен за 10 с при средней частоте прокручивания более 133 мин⁻¹. Среднее напряжение на НЭ в течении прокруток будет не менее 18,9 или 16,6 В соответственно на 10-й или 15-й секунде.

Для пуска двигателя в течение 5 с требуется очень большая емкость НЭ, т.к. необходимо обеспечить высокое напряжение (23,05 В) и мощность в конце прокрутки.

Если учесть, что емкость одного модуля НЭ равна 480Ф, то для пуска двигателя КамАЗ-740 при температуре -12⁰С потребуется 1,5 модуля. Разместить в аккумуляторном ящике можно только один модуль совместно с АБ 6СТ-110, 6СТ-90 или 6СТ-75, или два модуля совместно с АБ 6СТ-55.

Следовательно, при использовании АБ 6СТ-55 и трех модулей по 240Ф можно осуществлять надежный пуск при температуре -12⁰С, что соответствует требованиям ОСТ

Результаты расчета емкости НЭ при различных условиях пуска двигателя КамАЗ-740

Температура, °С	-10 °С			-12 °С		
Время пуска, с	15	10	5	15	10	5
Частота вращения ДВС, мин-1	100	118	146	133	158	210
Частота вращения стартера, мин-1	1130	1333	1650	1503	1785	2373
Мощность ДВС, кВт	2.54	3.13	4.03	4.0	5.0	6.95
Энергия ДВС, кДж	38.1	31.3	20.16	60	50.1	34.7
Ток стартера, А	503	520	540	570	590	610
Напряжение стартера, В	12.2	13.7	16.2	15.5	17.6	22.0
Начальное напряжение НЭ, В	23.50	23.48	23.46	23.43	23.41	23.39
Конечное напряжение НЭ, В	2.91	6.00	11.10	9.85	14.15	23.05
Емкость НЭ, Ф	367	297	218	630	637	897

Результаты расчетов показывают, что при температуре -10°C можно осуществить пуск холодного двигателя за 5с используя всего один модуль емкостью 240Ф, т.к. требуемая емкость составляет 218Ф. Таким образом, СЭП включающая один модуль емкостью 240Ф позволит осуществить надежный пуск холодного двигателя без средств облегчения пуска до температуры -10°C с любой АБ, отвечающей требованиям энергодобавки. Для оценки возможности пуска двигателя при совместном использовании НЭ и АБ необходима разработка специальной методики.

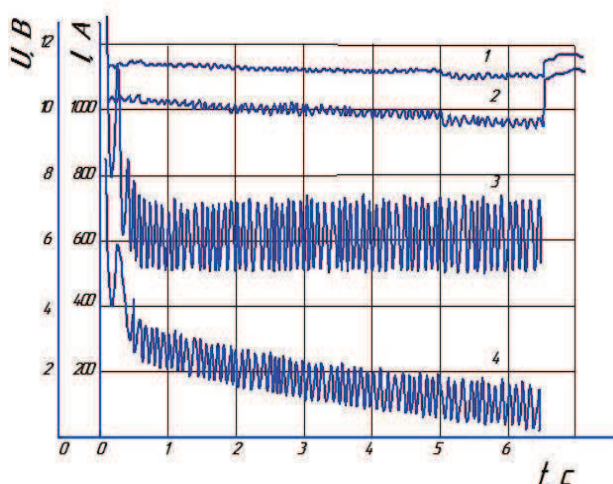


Рисунок 1. Прокрутка двигателя САТ3116 от батарей емкостью 160Ач и НЭ 12ПП-30: 1-напряжение АБ ($U_{аб}$), 2-напряжение стартера ($U_{ст}$), 3-ток стартера ($I_{ст}$), 4-ток разряда НЭ ($I_{нэ}$)

Результаты экспериментальных исследований показали, что при использовании АБ и НЭ в процессе прокрутки двигателя среднее значение тока стартера остается неизменным в течение всего периода прокрутки. Напряжение на стартере и источнике энергии линейно падает в функции времени. Ток НЭ изменяется по кривой близкой к экспоненте с большой постоянной времени (рисунок 1), и поэтому за период прокрутки двигателя она может быть аппроксимирована прямой, что значительно упростит дальнейшие расчеты. Некоторое расхождение реальной кривой от прямой приведет к несущественному увеличению расчетной емкости НЭ, что послужит небольшим запасом и повысит надежность пуска.

Накопители энергии в составе СЭП являются новым элементом, и поэтому пока не отработаны единые критерии для оценки их пусковых возможностей. Режимы проверки НЭ на

заводах-изготовителях отличаются от режимов, при которых НЭ работают в составе СЭП. В результате некоторые параметры (например внутреннее сопротивление), определенные разными способами, отличаются между собой.

В СЭП НЭ работает в стартерном режиме, то есть разряжается током в несколько сотен ампер. Наиболее целесообразно проведение исследований в стартерных режимах, поскольку параметры, определенные в этих режимах, наиболее точно отражают процессы, происходящие при прокрутке двигателя. Для этого был разработан тормозной стенд для исследования зубчатого зацепления стартера и венца маховика.

Конструктивно стенд выполнен в виде станины, на которой смонтированы: узел крепления стартера, тормозное устройство с механизмом привода, устройство для измерения крутящего момента стартера и маховика, датчик тахометра и коммутационная панель. Кинематическая схема стенда показана на рисунке 2.

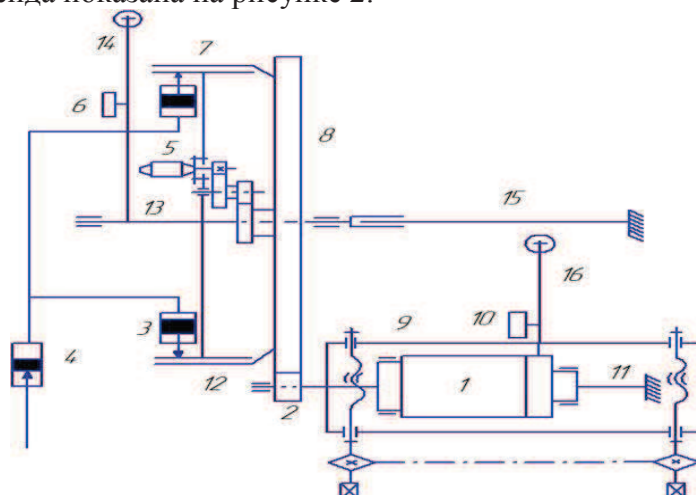


Рисунок 2. Кинематическая схема стенда:

1-стартер, 2-шестерня стартера, 3, 4- тормозной цилиндр, 5-датчик тахометра, 6, 10-датчик перемещений, 7-тормозной барабан, 8-венец маховика, 9-передвигной стол, 11, 15-торсионный вал, 12-вал стартера, 13-опорный вал, 14, 16-тарировочный рычаг

Узел крепления стартера включает подвижный стол, на котором закреплены опоры с подшипниками. Со стороны коллектора на стартере закреплен колпак с цапфой, устанавливаемый в подшипник второй опоры. В цапфе закреплен конец торсионного вала. Другой конец вала с помощью шлицевой муфты закреплен неподвижно. Такая конструкция позволяет стартеру поворачиваться на определенный угол вокруг своей оси, в зависимости от величины крутящего момента.

В качестве тормозного устройства использован колесный тормоз автомобиля ГАЗ-66. К тормозному барабану прикреплен маховик с венцом, имеющим 103 коррегированных зуба, модуль которых равен 4,25 мм. Тормозной барабан в сборе с подшипниками установлен на опорный вал, что дает ему возможность вместе с маховиком свободно вращаться вокруг этого вала. К фланцу опорного вала присоединен тормозной диск с закрепленными на нем колодками и тормозными цилиндрами. Концы опорного вала установлены в подшипники неподвижных опор. В шлицы опорного вала входит конец торсионного вала, другой конец которого закреплен неподвижно относительно станины. Давление жидкости к цилиндрам тормозного диска передается по гибкому шлангу от главного тормозного цилиндра.

При включении стенда шестерня стартера входит в зацепление с венцом маховика, который вместе с барабаном начинает вращаться. Если в гидросистеме создавать давление, то колодки разжимаются и крутящий момент от маховика передается через тормозной диск и опорный вал торсионному валу. Последний начинает проворачиваться на угол, зависящий от величины крутящего момента, передаваемого маховику. Измерительное устройство стартера рассчитано на максимальный крутящий момент 80Нм, а маховика - 750Нм.

Определение частоты вращения якоря стартера производится электротехометром ТЭ-

204. Привод датчика тахометра осуществляется от шестерни, закрепленной на ступице тормозного барабана. Корпус датчика закреплен на тормозном диске, что исключает дополнительные погрешности при определении крутящего момента, поскольку момент сопротивления, оказываемый датчиком, учитывается измерительным устройством.

Подвод питания к стартеру и датчикам осуществляется на коммутационной панели через разъемы и клеммы. Питание от панели к стартеру передается через гибкие переемычки. Токовая нагрузка на стартер задается изменением давления в гидросистеме путем изменения усилия на шток главного тормозного цилиндра. С этой целью был доработан привод штока, что позволило изменять усилие с помощью гирь, подвешенных на специальный рычаг.

На стенде использовался стартер СТ-103, применяемый на двигателях ЯМЗ-238. Для определения режима работы тормозного стенда для имитации прокручивания двигателя ЯМЗ-238 воспользуемся экспериментальными зависимостями, полученными при прокрутках указанного двигателя стартером с разной частотой при различных температурах. Частота вращения изменялась за счет изменения напряжения на стартере.

При пуске двигателя ЯМЗ-238 ток стартера, в зависимости от температуры, изменяется от 400А до 800А. Наименьшее значение получено при пуске прогретого двигателя. Наибольшее значение соответствует пуску холодного двигателя при температурах $-25-35^{\circ}\text{C}$. Но, как правило, при таких низких температурах двигатель пускают после предварительного разогрева предпусковым подогревателем, в результате чего момент сопротивления, а следовательно, и ток стартера уменьшаются. Наиболее приемлемыми для нашего случая являются температуры около -12°C , при которых осуществляется пуск холодного двигателя без использования средств облегчения пуска. При этих температурах ток стартера находится в пределах 600-650А. Таким образом, стартерный режим работы СЭП при пуске двигателя ЯМЗ-238 характеризуется токами 400-650А. Поскольку НЭ может работать параллельно с АБ, то минимальное значение тока НЭ может быть меньше. Учитывая это, тормозной стенд был настроен на изменение тока стартера в пределах 100-650А за счет изменения массы гирь, подвешиваемых на специальное устройство в пределах 5-30 кг.

Перед каждым разрядом НЭ заряжался от двух АБ 6СТ-190ТМ через ограничительный резистор сопротивлением 0,123Ом или от выпрямителя. Процесс стартерного разряда записывался двухкоординатным самописцем типа "Endim 622.01". Установка для исследования НЭ в стартерном режиме представлена на рисунке 3.



Рисунок 3. Общий вид установки для исследования НЭ в стартерном режиме

На тормозной установке в режиме стартерного разряда испытывались три типа накопителей:

- 24ПП-30/0.003 - АОЗТ "ЭЛИТ" Курского завода "Аккумулятор";
- ИКЭ-40/28 - АО "ПЗР" г. Псков;
- НСД-28/1 - НПП "ТЭК" г. Москва

Фрагмент зависимостей, записанных самописцем при разряде НЭ на стартер тормозного стенда, показан на рисунке 4.

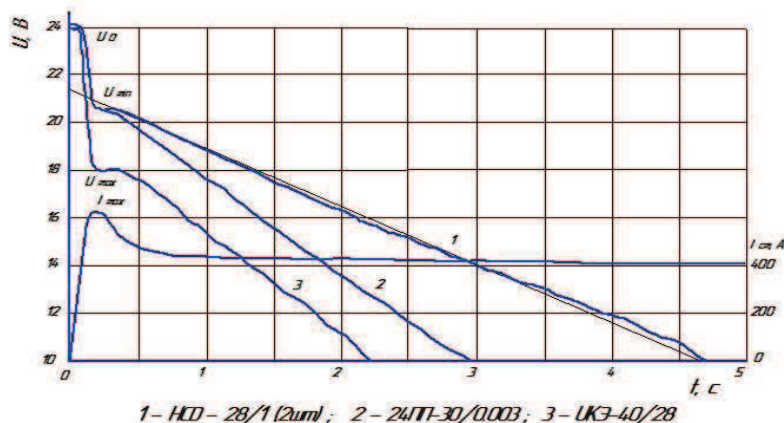


Рисунок 4. Разряд накопителей энергии на стартер СТ-103

Полученные зависимости подтверждает принятое ранее допущение о том, что при постоянстве среднего значения тока разряда напряжение НЭ практически линейно падает в функции времени. Только в начале прокруток, примерно через 0,2 с, происходит увеличение тока и уменьшение напряжения, вызванные увеличением частоты вращения вращающихся деталей. Уменьшение напряжения на НЭ в момент включения стартера обусловлен потерями на внутреннее сопротивление НЭ.

В результате стартерных разрядов накопителей трех типов и предварительных расчетов были получены данные (таблица 3), которые позволили сравнивать между собой испытываемые НЭ и выявить ряд зависимостей.

Таблица 3.

Основные параметры НЭ энергии в режиме стартерного разряда

Параметр	Тип накопителя энергии		
	24ПП-30/0,003	НСД-28/1	12ПП-4/0,003
Номинальное напряжение, В	24	24	24
Внутреннее сопротивление при 20°С, МОм	7,1	15,5	11,9
Энергия, отдаваемая в стартерном режиме, кДж(%)	15,8-13,0 (59-49)	15,3-12,0 (48-38)	15,0-8,5 (51-29)
Емкость НЭ при заряде постоянным током, Ф	92,8	110,3	99,4
Энергия, полученная НЭ, кДж	26,7	31,8	28,6
Размеры, мм			
Длина	305	286	308
Ширина	180	95	226
Высота	250	256	250
Объем, л	13,7	6,95	12,3
Масса, кг	28	12	30
Удельная энергия, кДж/л	1,95	4,54	2,40

Во-первых, выяснено, что наибольшую энергию отдает НЭ типа 24ПП-30/0.003, а наименьшую – НЭ типа ИКЭ-40/28 (параметры НЭ НСД-28/1 уменьшены вдвое, т.к. при испытаниях использованы два накопителя этого типа). Во-вторых, с увеличением тока разряда от 100А до 600А, отдаваемая энергия накопителя 24ПП-30/0.003 снижается с 15,8 до 13 кДж (18%); накопителя НСД-28/1 снижается с 15,3 до 12,0 кДж (22%) и накопителя ИКЭ-40/28 - с 15 до 8,5 кДж (43%). В-третьих, с увеличением начального напряжения отдаваемая энергия увеличивается пропорционально квадрату начального напряжения, следовательно, для сравнения накопителей энергии начального напряжения на их выводах должно быть одинако-

вым. Наиболее целесообразно это напряжение принять равным 24В, т.к. на автомобиле перед пуском двигателя НЭ от АБ может зарядиться не более, чем на 24В (соответствует номинальному напряжению бортовой сети). В таблице 3 представлены основные параметры НЭ в режиме стартерного разряда.

Сопrotивления НЭ типа 24ПП-30/0.003 оказалось более, чем в два раза выше паспортного значения (ЗМОм), а НЭ типа ИКЭ-40/28 в 1,4 раза (7МОм). Таким образом, в результате разрядов НЭ стартерными токами определена величина отдаваемой энергии при снижении напряжения от номинального до половины номинального и определены значения внутренних сопротивлений НЭ.

Полученные в результате исследований результаты будут использованы при разработке и обосновании требований к системе пуска с накопителями энергии, обеспечивающей повышение работоспособности автомобильной техники в условиях низких температур.

Литература

1. Квайт С.М., Менделевич Я.А., Чижков Ю.П. Пусковые качества и системы пуска авто-тракторных двигателей. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.
2. Чижков Ю.П. Исследование процесса прокручивания коленчатого вала двигателя при использовании в системе электростартерного пуска емкостного накопителя энергии. Межвузовский сборник научных трудов «Автомобильные и тракторные двигатели». Выпуск XIV. – М.: МАМИ, 1998. – С. 197-217.
3. Чижков Ю.П., Малеев Р.А., Шматков Ю.М. Режимы совместной работы аккумуляторной батареи и емкостного накопителя в системе электростартерного пуска. Межвузовский сборник научных трудов «Автомобильные и тракторные двигатели». Выпуск XIII. – М.: МАМИ, 1996. – С. 118-124.

Альтернативный источник электрической энергии на автомобиле: использование энергии отработавших газов

д.т.н. проф. Овсянников Е.М., к.т.н. доц. Ключкин П.Н., к.т.н. доц. Кецарис А.А., Акимов А.В.
*Университет машиностроения
495-223-05-23, доб. 1574*

Аннотация. В статье рассмотрен способ использования энергии, выбрасываемой вместе с отработавшими газами в окружающую среду, приведен обзор подобных разработок мировых производителей. Рекуперация «бесполезной» энергии позволяет исключить генератор системы электроснабжения и увеличить к.п.д. двигателя внутреннего сгорания.

Ключевые слова: электротурбогенератор, рекуперация энергии отработавших газов, альтернативный источник энергии.

Непрерывный прогресс и рост количества систем комфорта и других потребителей электроэнергии на автомобиле в последние годы изменили структуру его бортовой сети. Зачастую мощности генераторных установок уже не хватает: суммарная мощность потребления на автомобилях достигает 3-4 кВт.

Сегодня существует необходимость в новом источнике электроэнергии на автомобиле, пригодном для установки на все выпускаемые автомобили с различными типами двигателей, недорогим и надежным. Увеличение мощности штатного стандартного генератора вызывает массу сложностей: он практически уже не умещается под капотом, поликлиновый ремень не может передать большой крутящий момент, приходится применять для него свою жидкостную систему охлаждения, что значительно удорожает и усложняет конструкцию.

Найдено другое техническое решение: использовать энергию отработавших газов, которая сейчас в каждом ДВС выбрасывается в атмосферу в виде тепла и никак не используется. По оценкам специалистов, доля этой «бесполезной» энергии составляет около 30% (!) от энергии топлива при его сжигании.