

Исследование ступенчатого заряда емкостных накопителей энергии для систем электростартерного пуска

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

Аннотация. В работе предлагается использование ступенчатого заряда емкостных накопителей энергии для повышения их КПД заряда в системах электростартерного пуска с емкостным накопителем и аккумуляторной батареей.

Ключевые слова: система электростартерного пуска, емкостной накопитель энергии, ступенчатый заряд емкостного накопителя энергии, КПД заряда емкостного накопителя энергии.

Применение емкостных накопителей энергии (НЭ) в системах электростартерного пуска (СЭП) в качестве промежуточных источников электрической энергии ставит задачу разработки способов заряда накопительных конденсаторов и обеспечения передачи энергии от источника питания к конденсатору с максимальным КПД. В простейшем случае заряд НЭ осуществляется непосредственно от источника тока (аккумуляторная батарея, генератор и т.п.) или через дополнительный токоограничивающий резистор R (рисунок 1) [1]. При подключении НЭ сразу на полное напряжение источника тока (ИТ) обеспечивается заряд конденсатора до его номинального напряжения $U_{нэ}$, которое определяется формулой:

$$U_{нэ} = U_{п} \cdot (1 - e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}), \quad (1)$$

где: $U_{п}$ – напряжение источника питания (ИТ); t_3 – время заряда НЭ;

$\tau_3 = R_3 \cdot C_{нэ}$ – постоянная времени заряда НЭ;

R_3 – суммарное сопротивление зарядной цепи;

$C_{нэ}$ – емкость НЭ.

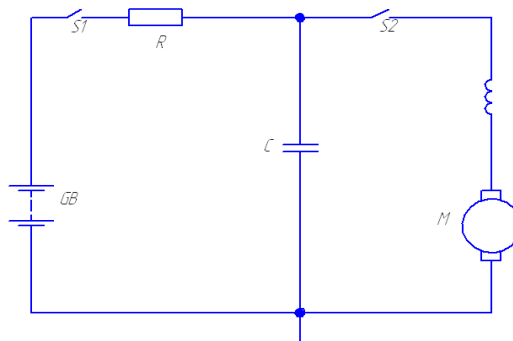


Рисунок 1. Эквивалентная расчетная схема СЭП с НЭ

Сопротивление зарядной цепи:

$$R_3 = R_{ит} + R_{пр} + R_{нэ} + R, \quad (2)$$

где: $R_{ит}$ – внутреннее сопротивление ИТ;

$R_{пр}$ – сопротивление проводов;

$R_{нэ}$ – внутреннее сопротивление НЭ;

R – сопротивление токоограничивающего резистора.

В зависимости от выбранного времени заряда и постоянной времени заряда будет изменяться напряжение заряда $U_{нэ}$.

Ток в цепи заряда изменяется по закону:

$$i_3 = \frac{U_{п}}{R_3} \cdot e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}. \quad (3)$$

Мощность ИТ:

$$P = i_3 \cdot U_{п} = \frac{U_{п}^2}{R_3} \cdot e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}. \quad (4)$$

Энергия, расходуемая ИТ в цепи заряда:

$$W_{ИТ} = \int_0^{t_3} p dt = \frac{U_{НЭ}^2 C_{НЭ}}{1 - e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}}. \quad (5)$$

Энергия, получаемая НЭ при полном заряде:

$$W_{НЭ} = \frac{C_{НЭ} U_{НЭ}^2}{2}. \quad (6)$$

КПД зарядной цепи:

$$\eta = \frac{W_{НЭ}}{W_{ИТ}} = 0,5 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}\right). \quad (7)$$

Таким образом, максимальный КПД зарядной цепи в этом случае не может превышать 50% [2]. КПД не зависит от активного сопротивления зарядной цепи, и, уменьшая активное сопротивление, можно лишь увеличить скорость заряда НЭ. При использовании НЭ в различных системах, в частности в СЭП, имеют место случаи, когда при работе на нагрузку НЭ полностью не разряжается, а его напряжение уменьшается не до нуля, а до какого-то минимального значения U_{min} (рисунок 2) [3]. В течение времени разрядного импульса НЭ отдает только часть запасенной энергии в нагрузку (на стартерный электродвигатель), если пуск ДВС осуществляется за несколько попыток, то в паузе между разрядными импульсами напряжение $U_{НЭ}$ на конденсаторе увеличивается до максимального значения U_{max}

$$U_{НЭ} = U_{min} + (U_{п} - U_{min}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}\right) = U_{max}. \quad (8)$$

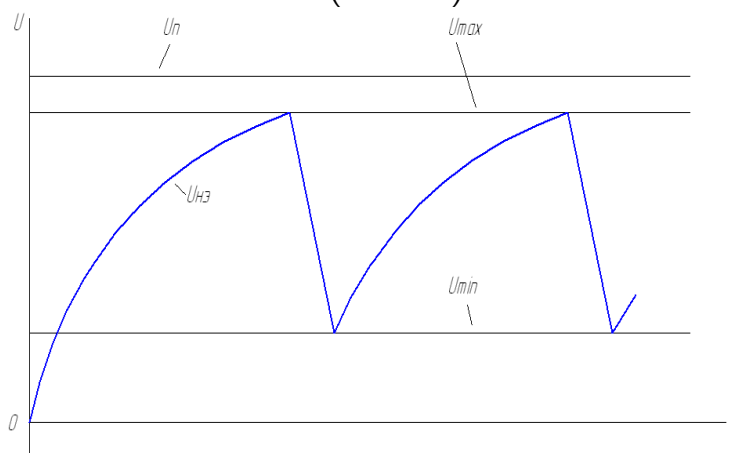


Рисунок 2. Изменение напряжения $U_{НЭ}$ при разряде НЭ до значения U_{min}

В зарядной цепи протекает ток:

$$I_3 = \frac{U_{п} - U_{НЭ}}{R_3} = \frac{U_{п} - U_{min}}{R_3} \cdot e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}. \quad (9)$$

Энергия, запасаемая в НЭ при заряде:

$$W_{НЭ} = 0,5 \cdot C_{НЭ} \cdot U_{max}^2 \cdot (1 - K_u^2), \quad (10)$$

где: $K_u = \frac{U_{min}}{U_{max}}$.

Энергия потерь в зарядной цепи:

$$W_{п} = \int_0^{t_3} I_3^2 \cdot R_3 \cdot dt = 0,5 \cdot C_{НЭ} \cdot (U_{п} - U_{min})^2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{2t_3}{\tau_3}}\right) = \frac{0,5 C_{НЭ} U_{max}^2 (1 - K_u)^2 \left(1 + e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}\right)}{1 - e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}}. \quad (11)$$

Энергия, расходуемая ИТ в зарядной цепи:

$$W_{ИТ} = W_{НЭ} + W_{п} = \frac{C_{НЭ} U_{max}^2 (1 - K_u) \left(1 - K_u \times e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}\right)}{1 - e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}}. \quad (12)$$

Пренебрегая коммутационными потерями, получим КПД зарядной цепи:

$$\eta_3 = \frac{W_{нэ}}{W_{ит}} = \frac{0.5(1+K_u) \left(1 - e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}\right)}{1 - K_u e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}} \quad (13)$$

КПД заряда возрастает с увеличением относительного времени заряда $\frac{t_3}{\tau_3}$ (рисунок 3). Если относительное время заряда НЭ $\frac{t_3}{\tau_3} \geq 3$, то оно практически не влияет на η_3 при всех K_u . КПД заряда существенно возрастает при увеличении коэффициента K_u .

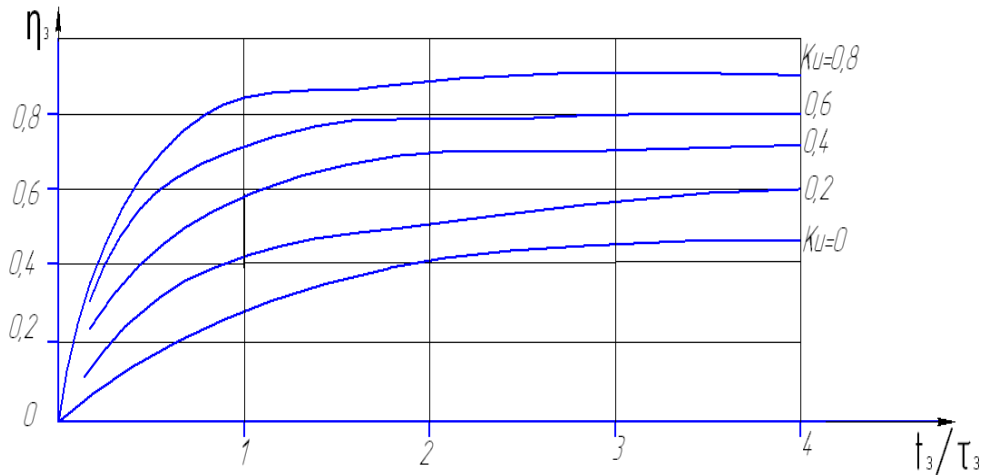


Рисунок 3. Зависимости $\eta_3=f\left(\frac{t_3}{\tau_3}\right)$ при различных значениях K_u

Таким образом, появляется возможность повысить КПД полного заряда НЭ путем ступенчатого увеличения напряжения источника питания, то есть осуществить заряд за несколько циклов (ступеней). Благодаря этому K_u на каждой ступени будет больше, чем при подключении НЭ сразу на полное напряжение источника питания [4].

Рассмотрим процесс заряда НЭ при ступенчатом изменении напряжения ИТ без изменения сопротивления зарядной цепи R_3 и, следовательно, постоянной времени τ_3 . Пусть число ступеней (циклов) заряда равно n , а интервалы изменения напряжения $\Delta U = U_{max} - U_{min}$ равны между собой. Тогда:

$$\Delta U = \frac{U_{нэ}}{n} = \frac{U_{п1} \left(1 - e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}\right)}{n}, \quad (14)$$

где: $U_{нэ}$ – полное (номинальное) напряжение заряда НЭ.

Если обозначить напряжение U_{max} как U_i , а напряжение U_{min} как U_{i-1} , то $\Delta U = U_i - U_{i-1}$ и зависимость напряжения U_i от времени принимает вид:

$$U_i = U_{п1} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}\right) + U_{i-1} \cdot e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}, \quad (15)$$

где: $U_{п1} = U_i + \frac{\Delta U e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}}{1 - e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}}$ – напряжение питания на i -ой ступени.

Энергия, запасаемая НЭ на каждой ступени заряда или на произвольной i -ой ступени

$$W_{нэi} = C_{нэ} \cdot \Delta U \cdot (U_i - 0,5 \cdot \Delta U). \quad (16)$$

В соответствии с выражением (14) напряжение заряда НЭ на i -ой ступени можно представить как $U_i = \Delta U \cdot i$ (i – порядковый номер ступени заряда). Тогда:

$$W_{нэi} = C_{нэ} \cdot \Delta U^2 \cdot (i - 0,5). \quad (17)$$

Энергия, полученная НЭ за весь процесс заряда до номинального напряжения $U_{нэ}$, равна:

$$W_{нэ\Sigma} = C_{нэ} \cdot \Delta U^2 \cdot (\sum_1^n i - 0,5n) = 0,5 \cdot C_{нэ} \cdot \Delta U^2 \cdot n^2. \quad (18)$$

Здесь $\sum_1^n 1 + 2 + 3 + \dots + n = \frac{1+n}{2} \cdot n$ – есть сумма n членов арифметической прогрессии с разностью 1.

Энергия, отдаваемая ИТ на i -ой ступени заряда НЭ, равна:

$$W_{итi} = C_{нэ} \cdot \Delta U^2 \cdot \left(i + \frac{e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}}{1 - e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}} \right). \quad (19)$$

Полная энергия, расходуемая в зарядной цепи, равна:

$$W_{ит\Sigma} = \sum_1^n W_{итi} = 0,5 \cdot C_{нэ} \cdot \Delta U^2 \cdot n^2 \cdot \left(1 + \frac{1 + e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}}{n \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_3}{\tau_3}} \right)} \right). \quad (20)$$

Энергия потерь в зарядной цепи на i -ой ступени, равна:

$$W_{\pi i} = \frac{0,5 \cdot C_{нэ} \cdot \Delta U^2 \cdot (1 + e^{-\frac{t_3}{\tau_3}})}{1 - e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}}. \quad (21)$$

Суммарные потери энергии в зарядной цепи равны:

$$W_{\pi\Sigma} = \sum_1^n W_{\pi i} = \frac{0,5 \cdot C_{нэ} \cdot \Delta U^2 \cdot n \cdot (1 + e^{-\frac{t_3}{\tau_3}})}{1 - e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}}. \quad (22)$$

Из выражения (22) следует, что при $\Delta U = \text{const.}$ на всех ступенях заряда энергия потерь остается неизменной и пропорциональной ΔU^2 . Учитывая, что в этом случае $\Delta U \cdot n = U_{нэ}$, получим выражения для определения энергетических параметров при ступенчатом заряде НЭ в виде:

$$W_{ит\Sigma} = 0,5 \cdot C_{нэ} \cdot U_{нэ}^2 \cdot \left(1 + \frac{1 + e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}}{n \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_3}{\tau_3}} \right)} \right), \quad (23)$$

$$W_{\pi\Sigma} = \frac{0,5 \cdot C_{нэ} \cdot U_{нэ}^2 \cdot (1 + e^{-\frac{t_3}{\tau_3}})}{n \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_3}{\tau_3}} \right)}, \quad (24)$$

КПД i -ой ступени заряда:

$$\eta_{3i} = \frac{W_{нэi}}{W_{итi}} = \frac{i - 0,5}{i + \frac{e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}}{1 - e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}}}, \quad (25)$$

КПД многоступенчатого заряда НЭ:

$$\eta_{3\Sigma} = \frac{n}{n + 1 + \frac{2 \cdot e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}}{1 - e^{-\frac{t_3}{\tau_3}}}}, \quad (26)$$

При условии, что $U_{нэ} = U_n$ и в каждом цикле заряда $\frac{t_3}{\tau_3} > 3$, формулы (23) - (25) будут иметь вид:

$$W_{нэ\Sigma} = 0,5 \cdot C_{нэ} \cdot U_{\pi}^2; \quad (27)$$

$$W_{ит\Sigma} = 0,5 \cdot C_{нэ} \cdot U_{\pi}^2 \cdot \frac{n+1}{n}; \quad (28)$$

$$W_{\pi\Sigma} = \frac{0,5 C_{нэ} U_{\pi}^2}{n}; \quad (29)$$

$$\eta_{3\Sigma} = \frac{n+1}{n}. \quad (30)$$

При увеличении числа ступеней заряда n и относительного времени заряда $\frac{t_3}{\tau_3}$ КПД заряда НЭ возрастает.

Однако, чтобы не допустить значительного увеличения времени полного заряда $t_3\Sigma$, значения t_3 не должны быть бесконечно большими. Время заряда одной ступени можно ограничить величиной $3\tau_3$, так как при этом $U_{нэ} = 0,96 U_n$.

Приведенные расчеты показывают, что максимальные КПД заряда будет в том случае, когда ступени напряжения ΔU источника питания одинаковы.

Для осуществления ступенчатого заряда НЭ возможно использование трансформатора с переменным коэффициентом трансформации, в котором изменение напряжения на выходе происходит путем изменения числа витков вторичной обмотки.

Зарядное устройство (рисунок 4) содержит: трансформатор 1, электронные ключи 2, устройство управления электронными ключами 3 с блоком питания 4, выпрямительный блок 5, сглаживающий конденсатор 6, токоограничивающий резистор 7 и НЭ 8. Вторичная обмотка трансформатора имеет несколько выводов, которые через электронные ключи подсоединены к выпрямительному блоку. Напряжение от НЭ подается на вход устройства управления электронными ключами, которое управляет работой ключей. Питание этого устройства осуществляется при помощи блока питания, напряжение на который подается с крайних выводов вторичной обмотки трансформатора. Электронные ключи представляют собой симметричные тиристоры (симисторы) 9 с управлением по аноду. Блок питания 4 содержит выпрямитель 11 и фильтрующий конденсатор 12. Устройство управления электронными ключами содержит операционные усилители (ОУ), включенные по схеме компаратора.

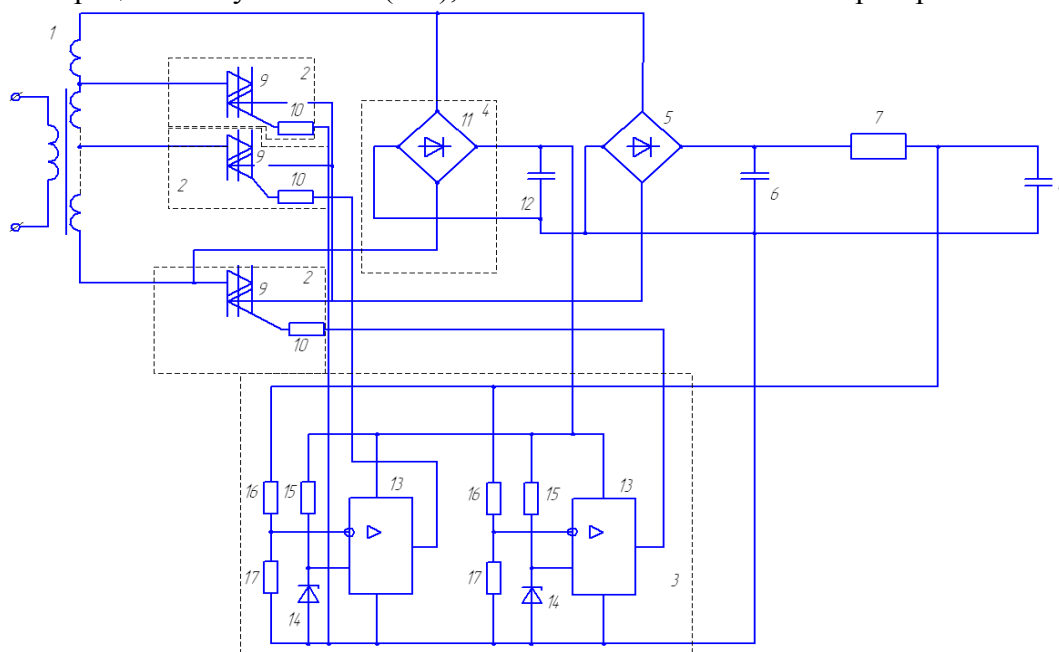


Рисунок 4. Зарядное устройство емкостных накопителей энергии

Принцип действия зарядного устройства заключается в следующем. При включении трансформатора в сеть в его вторичной обмотке наводится напряжение, которое при помощи блока 4 обеспечивает питание ОУ. Стабилитроны 14 и резисторы 15 обеспечивают уровни опорных напряжений на неинвертирующих входах ОУ. Управляющий электрод первого симистора через токоограничивающий резистор 10 соединяется с "минусом" блока питания 4, что обеспечит открытие первого симистора. На инвертирующий вход ОУ подается напряжение с обкладок НЭ, которое в начальный момент равно нулю. Таким образом, на выходе ОУ будет положительное напряжение, что обеспечит закрытое состояние остальных симисторов 9. При этом с первого вывода вторичной обмотки трансформатора 1 переменное напряжение через открытый симистор 9 будет подаваться на выпрямительный блок 5, что обеспечит с помощью сглаживающего конденсатора 6 появление первой ступени постоянного напряжения заряда НЭ 8. Когда напряжение на НЭ достигнет определенной величины, а напряжение, подаваемое на инвертирующий вход ОУ через делитель напряжения на резисторах 16 и 17, станет равно напряжению на неинвертирующем входе, на выходе ОУ установится отрицательное напряжение. Это вызовет открытие второго симистора 9, а первый симистор 9 закроется, так как к нему будет прикладываться более высокое напряжения обратной полярности через открытый второй симистор, и на выходе выпрямительного блока 5 появляется более высокое напряжение второй ступени заряда НЭ. При заряде НЭ до определенной величины напряжения открывается третий симистор и закрывается второй, что обеспечивает новое скачкообразное увеличение напряжения на выходе выпрямительного блока. По мере увеличения напряжения на НЭ последовательно включаются все последующие, и выключаются все предыдущие симисторы. Таким образом, зарядное устройство обеспечивает ступенчатый

заряд НЭ. При таком способе заряда уменьшаются потери энергии в зарядной цепи, и КПД заряда НЭ возрастает.

На рисунке 5 представлены расчетные зависимости параметров при ступенчатом заряде НЭ емкостью 10 Ф через токоограничивающий резистор величиной 0,02 Ом с шестью ступенями с промежутком через 2В до 12В. В этом случае КПД заряда η_3 составит 0,84.

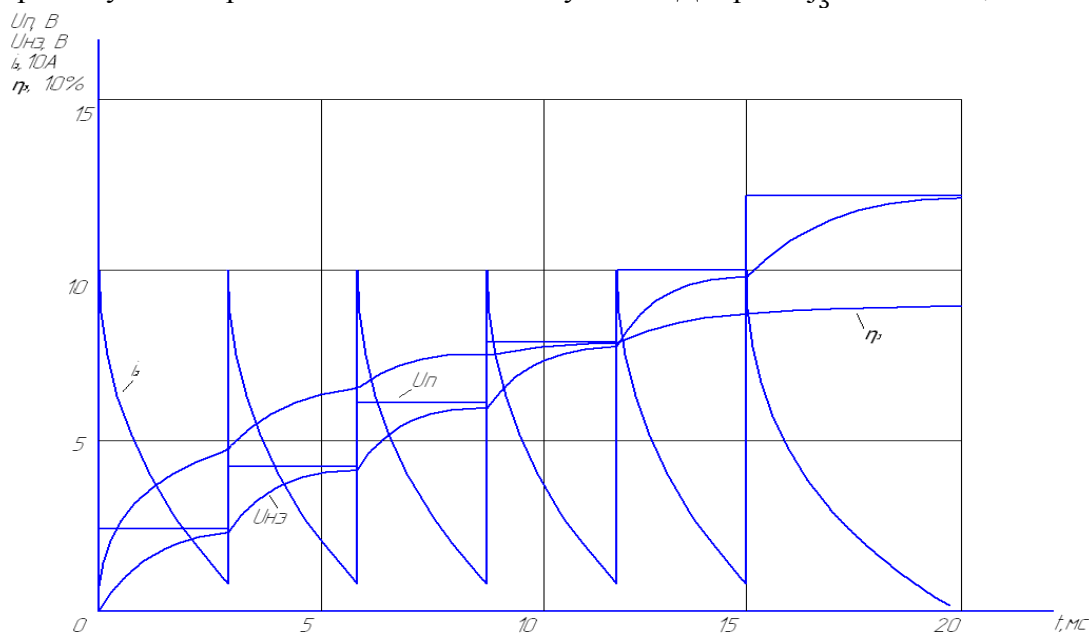


Рисунок 5. Изменение параметров $U_{нэ}$, i , η_3 при ступенчатом заряде НЭ

Выводы

1. Одним из способов повышения КПД полного заряда НЭ является применение ступенчатого заряда за несколько циклов. При увеличении числа ступеней КПД заряда возрастает.
2. Для ограничения времени полного заряда время заряда на каждой ступени целесообразно ограничить величиной равной трем постоянным времени заданной цепи.
3. Максимальный КПД заряда будет в том случае, когда ступени изменения напряжения источника питания одинаковы.

Литература

1. 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.
2. 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.
3. Квайт С.М., Менделевич Я.А., Чижков Ю.П. Пусковые качества и системы пуска авто-тракторных двигателей. - М., Машиностроение, 1990. – С. 256.
4. Лебедев С.А., Гаврицкий Д.А., Антипенко В.С. Пусковое устройство с молекулярным накопителем энергии. – М.: Известия МГТУ «МАМИ». Научный рецензируемый журнал, № 2(24), 2015, т. 1.