

УДК621.3

А.С. Репин, В.В. Гуляев, О.А. Бурмакин

**ДИНАМИКА СИСТЕМ СТАРТЕРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДИЗЕЛЯ  
С ЕМКОСТНЫМИ НАКОПИТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ**

Волжская государственная академия водного транспорта

Рассмотрены вопросы динамики систем стартерного электропривода с накопителями энергии молекулярного типа. Исследованы разомкнутые системы пуска с параллельным включением стартерной батареи и накопителя, а также проблемы использования накопителя в качестве самостоятельного источника питания стартерного двигателя. Получены и проанализированы динамические и интегральные энергетические характеристики и показатели таких систем.

*Ключевые слова:* стартерный электропривод, электростартерный пуск, молекулярный накопитель.

Системы пуска ДВС транспортных средств, дизель-генераторных установок (ДГУ) автономных источников электроснабжения и станций базируются на основе стартерных двигателей (СД) постоянного тока, как правило, последовательного возбуждения. До сих пор подавляющее число электростартерных систем реализует запуск двигателей методом прямого включения, а сама система стартерного электропривода с точки зрения регулирования имеет разомкнутую структуру.

Долгое время считалось, что использование принципа регулирования по отклонению в стартерном электроприводе нецелесообразно, поскольку главной задачей системы пуска является выведение двигателя за регламентированное время в режим, когда его угловая скорость вращения становится выше пусковой и индикаторная работа превышает работу, затрачиваемую на преодоление момента сопротивления движению. В этом случае имеют место постоянные устойчивые вспышки топлива в цилиндрах дизеля и создаются благоприятные условия для его успешного запуска в работу. Часто вывод дизеля в установившийся режим сопровождается переходом в режим холостого хода с последующим набросом нагрузки (система пуска ДГУ).

Такой традиционный подход, сложившийся в проектировании электростартерных систем, в частности, приводит к тому, что электрическая емкость стартерных батарей зачастую завышается и избыточна, увеличиваются стоимость и массогабаритные показатели системы. В процессе эксплуатации запуск двигателей сопровождается огромными пиковыми токами в начальный момент пуска, глубокими провалами напряжения на зажимах стартерной батареи, быстрым отбором требуемой электрической емкости, опережающим нормальную скорость протекания химических реакций в источнике. Это приводит к тому, что заявленный производителем срок службы аккумуляторных батарей сокращается на 30–50%, особенно, если система эксплуатируется в жестких климатических условиях.

В то же время ужесточение требований к современным системам пуска в части снижения энергопотребления, повышения надежности пуска и их отдельных элементов заставляет пересматривать сложившиеся подходы к их разработке и искать новые пути их совершенствования. Широкое распространение получает софт-стартерный пуск [2], замкнутые системы с контролем тока разряда стартерной батареи, системы пуска с изменяемой структурой источника питания и др.

Одним из перспективных направлений этой работы является привлечение в стартерный электропривод электрических накопителей – импульсных конденсаторов сверхвысокой энергоемкости (ИКСЭ)[1]. ИКСЭ по принципу действия представляет собой накопитель мо-

лекулярного типа и способен аккумулировать энергию большого объема. Отечественной и зарубежной промышленностью освоен выпуск накопителей для систем стартерного электропривода емкостью до 300 Ф при рабочем напряжении в десятки вольт. Энергоемкость таких накопителей оказывается достаточной для осуществления пуска дизелей даже средней и большой мощности, без использования в процессе запуска аккумуляторных батарей.

В связи с изложенным представляет интерес исследование динамики таких систем как при работе накопителя совместно с аккумуляторной батареей, так и в качестве индивидуального источника питания СД, с предварительным зарядом его от аккумуляторной батареи перед пуском. В последнем случае важно знать количество возможных попыток пуска от накопителя в зависимости от его электрической емкости и от мощности силового агрегата.

Следует отметить, что системы с накопителями молекулярного типа предложены уже достаточно давно и известны отдельные и вполне успешные попытки их практического внедрения. Однако строгого систематического исследования динамики таких систем с получением интегральных показателей практически не предпринималось.

С 2002 по 2012 годы авторами выполнена разработка теоретической базы для моделирования таких систем и осуществлены работы практического характера по сбору, анализу и систематизации отдельных показателей опытно-экспериментальных систем стартерных электроприводов с накопителями для запуска дизелей К6S310DR, мощностью 885 кВт.

Математически процесс пуска может быть описан системой дифференциальных уравнений, которая претерпевает изменения при переходе системы от одного этапа пуска к другому. Процесс пуска представляется трехэтапным: 1-й этап – дизель является нагрузкой СД, 2-й этап – совместная работа СД и дизеля, ввиду появления устойчивых вспышек топлива в цилиндрах, 3-й этап – самостоятельная работа дизеля с выходом в установившийся режим. На всех этапах дизель рассматривается как объект регулирования угловой скорости (оборотов).

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{GB} = u_{p.ц.} - i_{GB} \cdot r_{ном.} \\ u_{GB} = u_C = e_M + i_a \cdot r_a + L_a \frac{di_a}{dt} \\ i_a = i_C + i_{GB} \\ i_C = -C \frac{du_C}{dt} \\ J_{э.пр.} \frac{d\omega_M}{dt} = \begin{cases} 0, n_{пр} \rightarrow M_{M.эм.} < M_{с.пр.N.}, M_{M.эм.} = M_{с.пр.}, \omega_{диз.} = 0 \\ M_{M.эм.} - M_{с.пр.N.}, n_{пр} \rightarrow 0 < \omega_{диз.} < \omega_{пуск.}, M_{M.эм.} \geq M_{с.пр.N.} \\ M_{диз.эф.пр.} + M_{M.эм.} - M_{с.пр.N.}, n_{пр} \rightarrow \omega_{пуск.} \leq \omega_{диз.} < \omega_{уст.}, \\ M_{M.эм.} \geq M_{с.пр.N.} \end{cases} \\ e_M = c\phi_M \omega_M = ck_a \cdot (i_C + i_{GB}) \omega_M \\ \phi_M = k_a i_a = k_a \cdot (i_C + i_{GB}) \\ M_{M.эм.} = c\phi_M i_a = ck_a \cdot (i_C + i_{GB})^2 \end{array} \right.$$

Этой системе соответствуют структурные схемы, представленные на рис. 1, которые отражают работу системы от 0 до пусковой частоты вращения коленчатого вала дизеля и от пусковой частоты вращения до значения, соответствующего 115–120% пусковой частоты, то есть на 1-м и 2-м этапах пуска. На 3-м этапе пуска вступает в работу объединенный регулятор дизеля, и структура приобретает известный замкнутый вид с ПИ–регулятором.

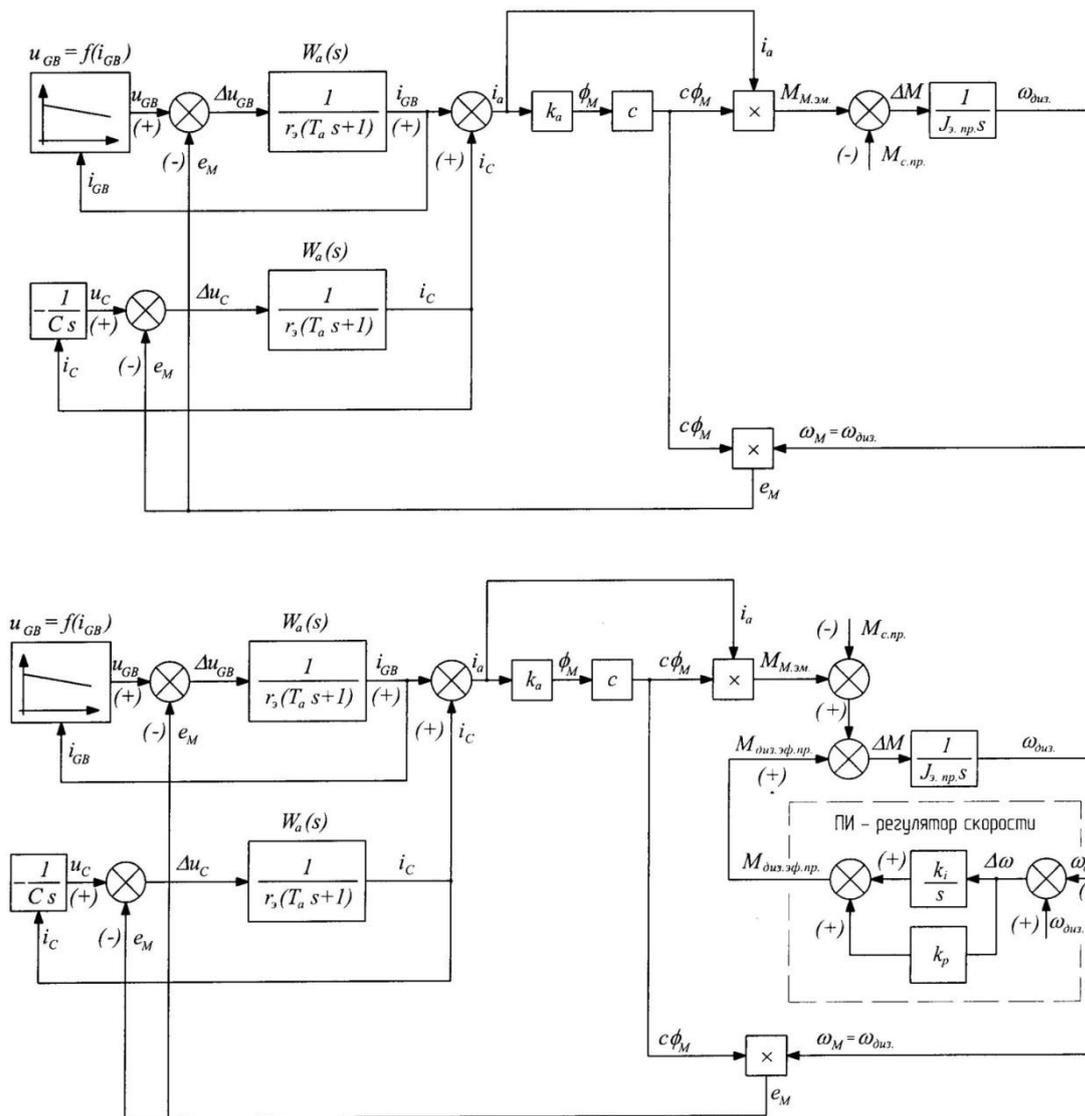


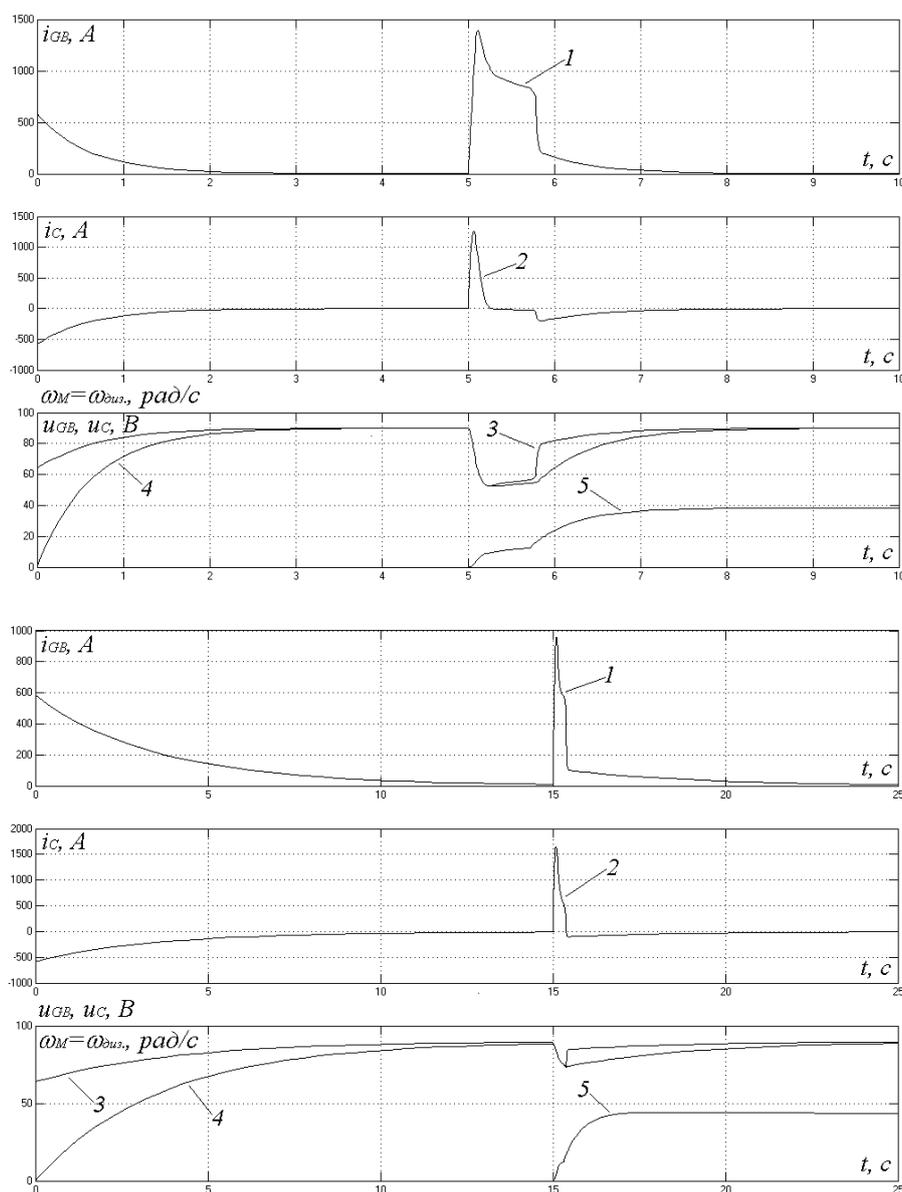
Рис. 1. Структурные схемы системы электростартерного пуска дизеля с емкостным накопителем энергии

Работа системы предполагает предпусковой заряд накопителя от аккумуляторной батареи с последующим включением их на параллельную работу. Причем цепи разряда стартерной батареи и накопителя в процессе пуска разделены между собой диодами. Это сделано для исключения обмена энергией между батареей и накопителем в процессе пуска и устранения уравнительного тока между ними. При такой схеме включения накопитель берет на себя кратковременную пиковую нагрузку в начале пуска, что создает хорошие условия для «отрыва» вала от мертвой точки покоя. Стартерная батарея в этот момент работает в облегченном режиме, способствуя дальнейшей раскрутке коленчатого вала дизеля до пусковой частоты вращения. Разгрузка стартерной батареи с переводом значительной части пиковой мощности на накопитель существенно улучшает процесс отбора мощности, что положительно сказывается на увеличении срока ее службы.

Ресурсные испытания стартерных батарей показывают, что снижение пикового тока разряда в два раза позволяет повысить срок службы аккумуляторов в 1,6–1,8 раза. Однако параллельное включение батареи и накопителя придает системе в целом и существенный недостаток: общий ток разряда в нагрузку (ток СД) становится больше, по сравнению с аналогичным показателем в режиме прямого включения при питании СД только от аккумулятора.

Это приводит к увеличению динамических нагрузок на отдельные элементы системы, ухудшает условия коммутации тока в СД, сокращая сроки его межремонтных пробегов. Поэтому привлечение в структуру стартерного электропривода накопителей целесообразно осуществлять совместно с преобразователями, реализующими принцип импульсного отбора мощности от комбинированного источника питания СД при пуске.

Динамические характеристики разомкнутой системы с комбинированным источником питания СД на примере пуска дизеля мощностью 885 кВт с накопителями емкостью 4 Ф и 23 Ф приведены на рис. 2.

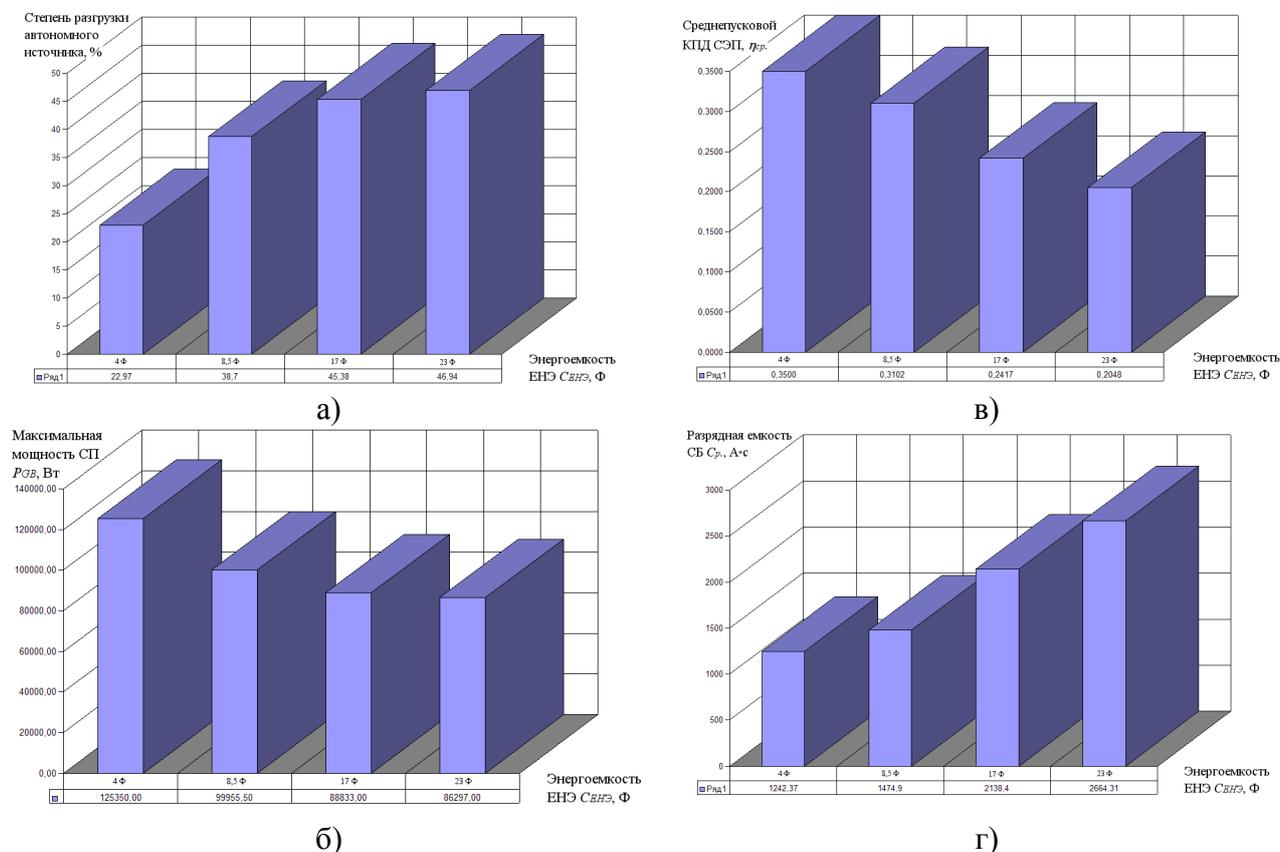


**Рис. 2. Динамические характеристики системы пуска с накопителями различной емкости:**  
 1 – ток разряда автономного источника (стартерной батареи); 2 – ток заряда/разряда накопителя;  
 3 – напряжение на внешних зажимах стартерной батареи; 4 – напряжение на внешних зажимах накопителя; 5 – угловая скорость вала СД, равная скорости коленчатого вала дизеля;  
 а –  $C_{EHЭ} = 4$  Ф,  $i_{GB, \max} = 1393$  А;  $\Delta u_{GB} = 37,4$  В; б –  $C_{EHЭ} = 23$  Ф,  $i_{GB, \max} = 988,6$  А;  $\Delta u_{GB} = 31,12$  В;

Из рассмотрения характеристик видно, что с увеличением электрической емкости накопителя пиковое значение тока разряда снижается, в то время как ток разряда накопителя – увеличивается. Очевидно, что при разработке таких систем должен обеспечиваться разум-

ный баланс между качественными показателями переходного режима пуска с одной стороны и массогабаритными, стоимостными показателями, с другой.

Использование накопителей с энергетической точки зрения иллюстрируют обобщенные интегральные характеристики, представленные в виде столбцовых диаграмм на рис. 3.



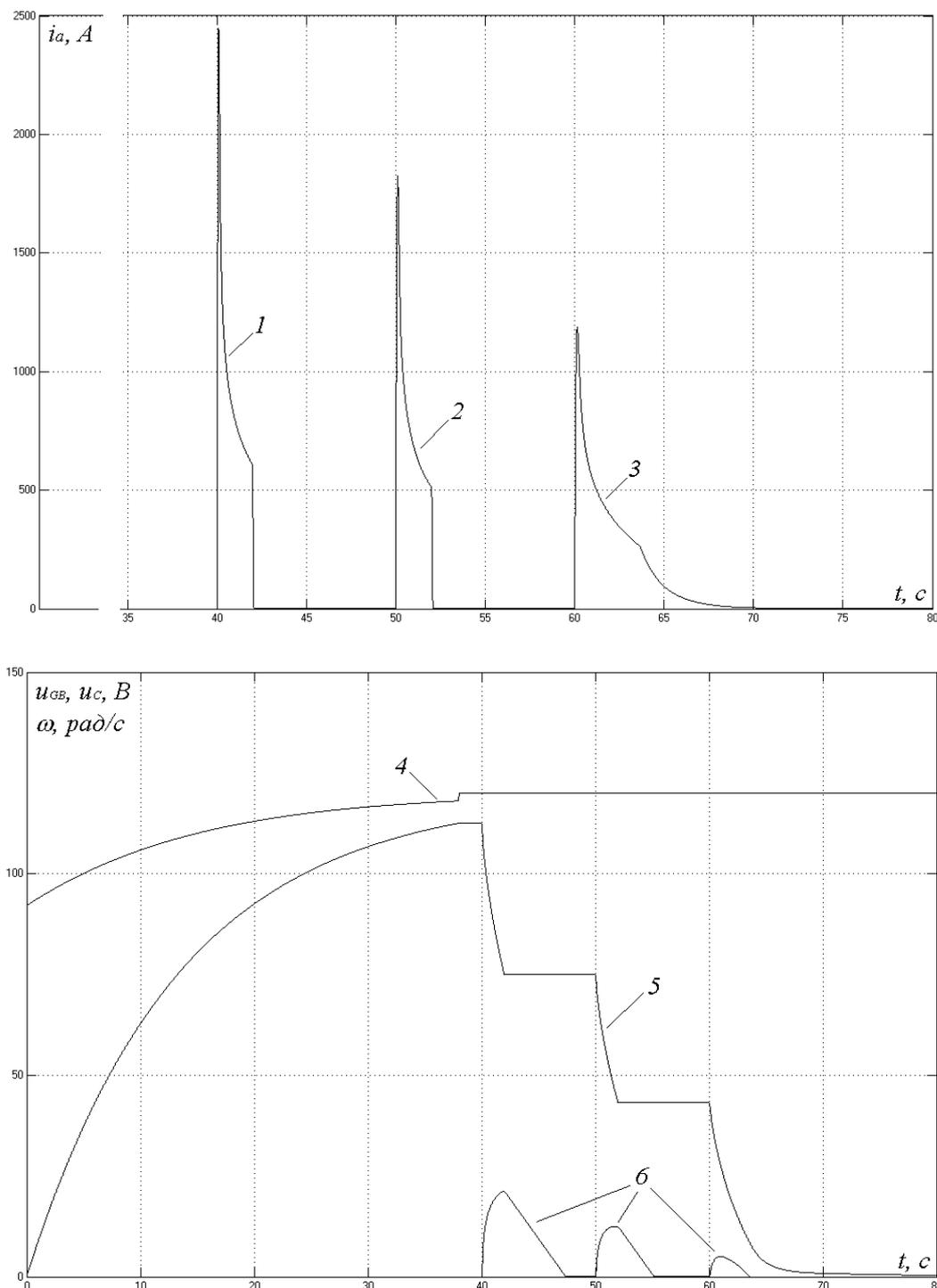
**Рис. 3. Удельные и интегральные характеристики систем пуска с накопителями, необходимые для оценки эффективности их использования в буферном режиме совместно с СБ**

С увеличением емкости накопителя, повышается степень разгрузки стартерной батареи, улучшается режим ее работы и одновременно снижается значение мощности, необходимой для успешного запуска двигателя. В то же время снятие пиковой нагрузки в начальный момент времени приводит к некоторому затягиванию процесса пуска и, как следствие, к увеличению разрядной емкости, отдаваемой источником в нагрузку. Поэтому использование накопителя положительно сказывается на характере отбора мощности от стартерной батареи, а значит, и на ее сроке службы.

Моделирование системы пуска с накопителем в качестве индивидуального источника питания СД может быть выполнено с использованием тех же структурных схем рис. 1. Для этого достаточно исключить канал формирования выходной координаты стартерной батареи – тока ее разряда  $i_{GB}$ .

Динамические характеристики такой системы с накопителем емкостью 50 Ф представлены на рис. 4. Здесь имеет место серия неудачных попыток пуска дизеля.

Из рассмотрения этих кривых видно, что от попытке к попытке накопитель теряет свой заряд, а пиковое значение тока разряда снижается. Варьируя номинальным напряжением источника заряда и энергоемкостью накопителя можно аккумулировать такое количество энергии, которое обеспечит требуемое число пусков дизеля. Однако на практике число возможных пусков двигателя конечно и невелико. Это обусловлено тем, что, во-первых, современные ИКСЭ имеют максимальное рабочее напряжение не более 200 В и, во-вторых, их высокая электрическая емкость сочетается с довольно высокими массогабаритными показателями.

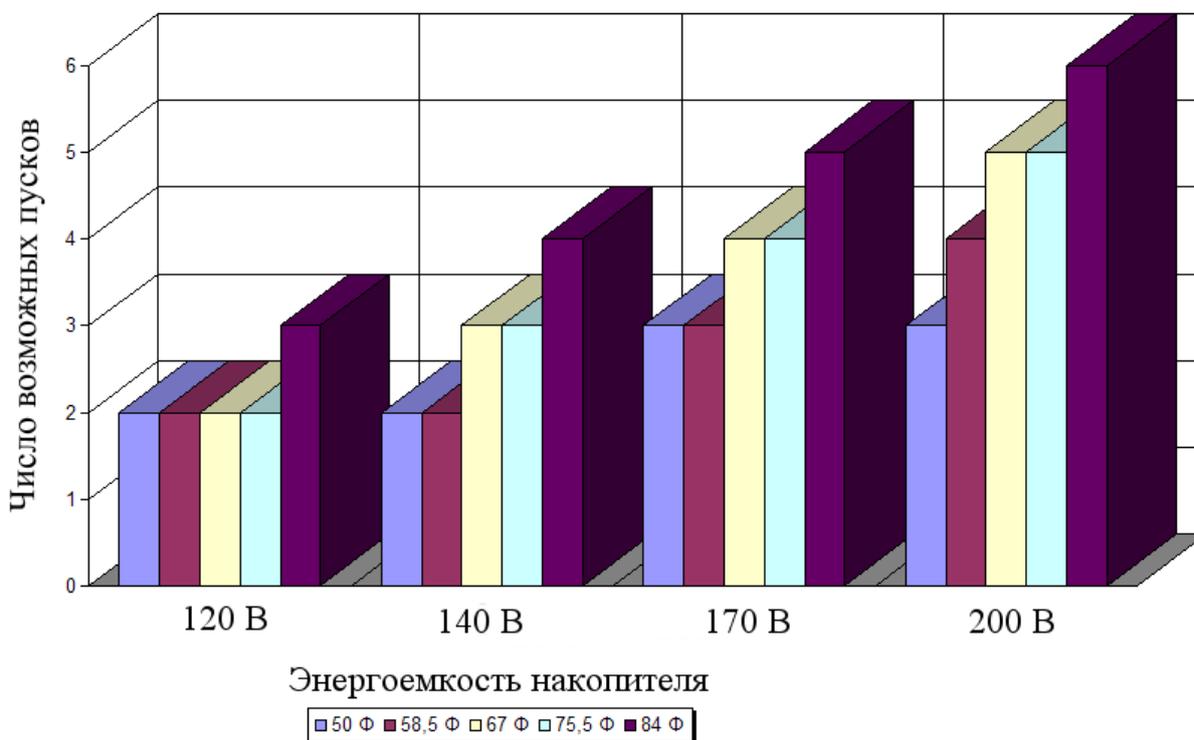


**Рис. 4.** Динамические характеристики переходного режима пуска дизеля в системе накопитель – СД последовательного возбуждения при наличии серии неудавшихся попыток запуска:  
 $a - 1, 2, 3 - i_a = i_C = f(t)$ ;  $b - 4 - u_{GB} = f(t)$ ;  $5 - i_C = f(t)$ ;  $6 - \omega_{диз.} = f(t)$

Эффективность использования различных накопителей в системе может быть оценена по интегральным столбцовым диаграммам рис. 5.

Анализируя полученные результаты, представляется, что привлечение в структуру стартерного электропривода дизеля накопителей и импульсных преобразователей придаст системам пуска ряд ценных качеств в части надежности, существенного улучшения динамич-

ческих характеристик и показателей, расширит температурный диапазон эффективного использования на практике.



**Рис. 5. Зависимость числа возможных пусков дизеля в системе накопитель – СД последовательного возбуждения от количества энергии, запасенной в ИКСЭ**

#### Библиографический список

1. **Репин, А.С.** Система стартерного электропривода с дискретно-импульсным регулятором напряжения и ячейковыми накопителями энергии / А.С. Репин, В.В. Гуляев, О.А. Бурмакин // Труды 14-го международного научно-промышленного форума «Великие реки – 2012». Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек. Т. 2. С. 284–286.
2. **Репин, А.С.** Система электростартерного пуска двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с адаптивным ШИМ-регулятором / А.С. Репин, О.А. Бурмакин, В.В. Гуляев // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Вып. № 33. С. 196–200.

Дата поступления  
в редакцию: 01.07.2014

**A.S. Repin, V.V. Gulyaev, O.A. Burmakin**

#### **DYNAMIC MODES OF DIESEL'S ELECTRICAL STARTING SYSTEMS WITH CAPACITOR STORES OF ENERGY**

Volga State Academy of Water transport

Questions of system's dynamics of the start-up electric drive with stores of energy of molecular type are considered. The opened systems of start-up with parallel turning on of the start-up battery and the store, and also a problem of use of the store as the independent power supply of the start-up engine are investigated. Dynamic and integrated power characteristics and indicators of such systems are received and analyzed.

*Key words:* start-up electric drive, electrical start-up, molecular store.