

ПУСК ЛОКОМОТИВНЫХ ДИЗЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ

**А.И. Беляков, ЗАО «ЭЛИТ», пр-т Ленинского комсомола,40,
Курск-26, 305026, Россия.**

**Представлено на «Advanced Capacitors World Summit 2003»,
11-13 августа, 2003г, Вашингтон, США.**

ВВЕДЕНИЕ.

Электрохимические конденсаторы получают всё более широкое распространение в различных сферах применения, начиная с малогабаритной электроники и средств связи до крупных энергосистем с запасом энергии в несколько мегаджоулей.

Этому способствовали всесторонние исследования природы и возможных потребительских качеств электрохимических конденсаторов (1). Уникальные параметры по выходной мощности и сроку службы изначально определили использование таких конденсаторов в мощных процессах и для обеспечения повышения уровня надёжности в эксплуатации. Этот тип источников тока успешно конкурирует в областях применения, ранее оккупированных батареями. В зависимости от энергозапаса конденсатора он обычно используется в системах вместе с батареей или вместо неё.

Прикладные исследования начала-середины 90-х годов привели к созданию семейства конденсаторов для пуска двигателей внутреннего сгорания (2, 3) которые уже несколько лет успешно применяются для пуска двигателей дорожных машин: автомобили – грузовики – автобусы и др.

В настоящей статье описывается возможность адаптации конденсаторных комплектов для пуска тяжёлых двигателей локомотивов (более 1000 л.с.), приведены данные испытаний на объектах, показаны преимущества новых пусковых систем и их экономическая эффективность применения.

Необходимо отметить, что комбинированные системы пуска батарея + конденсатор успешно эксплуатируются на рельсовом транспорте уже более 10 лет, постепенно вытесняя традиционные только аккумуляторные системы.

1. ОСОБЕННОСТИ ПУСКА ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛОКОМОТИВОВ.

Пуск крупных дизельных двигателей значительно отличается от пуска двигателей внутреннего сгорания с небольшим рабочим объемом цилиндров (легковые автомобили, грузовики и т.д.). Отличие характеризуется более высокой подвешенной массой движущихся частей: коленвал + поршни, а также более высоким сопротивлением движению поршня в цилиндре. Последнее определяет эффективность дизеля – чем выше степень сжатия, т.е. давление в цилиндре, тем выше его КПД.

При пуске обычного малолитражного двигателя, стартерная батарея, разряжаясь на нагрузку электромашин – стартера, раскручивает вал основного двигателя до пусковой частоты. Через определенное число рабочих ходов коленвала реализуются все операции пуска: всасывание топлива, смесеобразование, сжатие, воспламенение.

При пуске дизельного двигателя локомотива, стартерная батарея сначала работает на гидравлические насосы, которые создают давление и подвешивают вал двигателя перед пуском. В холодное время года осуществляется также подогрев масла в гидросистеме и иные операции по разогреву двигателя. Как правило, время предпусковой подготовки составляет от 30 до 60 секунд и к моменту старта двигателя батарея уже истратила некоторую часть своей емкости. Помимо функций предпусковой подготовки и пуска, бортовая батарея локомотива обеспечивает работу бортовой автоматики и компрессоров сжатого воздуха, питающего тормозные системы вагонов при неработающем дизеле.

В режиме работы локомотива при частых остановках с глушением двигателя (по экологическим ограничениям на пассажирских станциях), мощности бортового генератора не хватает для поддержки нормального уровня степени заряженности бортовой батареи ($\approx 70\%$). Довольно часты случаи снижения емкости батареи до 30% от номинального. При этом увеличивается внутреннее сопротивление бортовой батареи, снижается пусковой ток стартера, увеличивается время прокрутки вала дизеля до момента надежного пуска. Эта ситуация значительно снижает надежность работы локомотива, иногда старт может не произойти. Частые и глубокие разряды чреваты ускоренным выходом из строя бортовой батареи, особенно свинцово-кислотной. Эксплуатирующие организации часто становятся перед дилеммой: или не выключать двигатель на остановках и терять топливо на холостых оборотах, или увеличивать установочную емкость батареи и мощность бортового генератора.

Резюмируя вышесказанное, можно отметить два основных момента:

- циклограмма пуска двигателя локомотива значительно отличается от таковой для дорожного транспорта;

- бортовая батарея локомотива более перегружена по сравнению с батареей дорожного транспорта.

Существует два широко распространенных режима эксплуатации электрохимических конденсаторов в объектах применения. Первый – хранение конденсатора в рабочей схеме в незаряженном состоянии. При этом конденсатор заряжается непосредственно перед использованием и после разряда на рабочую нагруз-

ку отключается от зарядной схемы до следующего включения. Преимуществом этого вида эксплуатации является очень большой срок службы конденсатора, т.к. в промежутках между включениями его напряжение близко к нулю. Все процессы на электродах, ведущие к старению, как бы «заморожены» в этом состоянии. Но существует эксплуатационное неудобство этого метода – требуется время на полный заряд конденсатора.

Второй способ эксплуатации демонстрирует высочайшую готовность немедленного разряда, но при этом срок службы конденсаторного комплекта ниже чем в первом режиме и требуются меры по уравниванию напряжений элементов высоковольтной цепи.

Наличие периода предстартовой подготовки для пуска дизеля локомотива принципиально позволяет применять первый алгоритм, при этом возможен спокойный длительный заряд конденсатора от бортовой батареи без перегрузки её по току.

2. БАТАРЕЙНЫЙ ПУСК. ПРОФИЛЬ ТОК-НАПРЯЖЕНИЕ.

Имеются 3 электрохимические системы, в основном используемые в стартерных батареях для пуска тепловозных двигателей. Это свинцово-кислотные, никель-кадмиевые, никель-железные батареи.

Сравнительные данные некоторых локомотивных батарей приведены в табл.1.

Таблица 1

Электрохимическая система	Напряжение батареи, В	Ёмкость (5-часовой разряд), А·ч	Пусковые характеристики		Удельная мощность, Вт/А·ч
			Максимальный ток разряда, А	Напряжение батареи при максимальном токе, В	
1. Свинцово-кислотная	96	450	2400	48	256
2. Никель-железная	64	550	2200	37	148
3. Никель-кадмиевая	96	160	2700	46	776

Для свинцово-кислотных и никель-железных батарей в основном применимо правило «5С». Это означает, что ёмкость батареи выбирается из расчёта 1/5 максимального значения пикового тока. Так если пиковый ток при пуске равен 2000-2200А, номинальная ёмкость батарей составит 400-500 А·ч. В конструкции элементов этих двух типов батарей используются относительно толстые электроды (более 3 мм) и свободный объём электролита. Но внутреннее сопротивление достаточно велико и в режиме старта напряжение падает до 0,5 номинального значения.

Для никель-кадмиевых батарей более применимо правило «10-15С», их конструкция предусматривает применение тонких электродов, обеспечивающих более низкое внутреннее сопротивление элементов батареи, по сравнению со свинцово-кислотными и никель-железными батареями.

Температурный интервал эксплуатации стартерных батарей достаточно широк: от -45 °С до +55 °С окружающей температуры. Поэтому конструктивно все локомотивные батареи выполнены негерметичными (вентилируемыми), т.к. невозможно обеспечить стабильный температурный режим заряда батареи состоящий из герметичных аккумуляторов, исключая «тепловой разгон». Это увеличивает эксплуатационные издержки за счёт необходимости регулярного обслуживания негерметичных элементов. Потере электролита в эксплуатации способствуют также перегрузки по току в начальный момент пуска. Для свинцово-кислотных батарей перегрузка по току приводит также к ускоренному оплыванию активной массы положительного электрода. Для никель-железных и никель-кадмиевых батарей с элементами имеющими «rocket type» электродную конструкцию это чревато усиленным вымыванием порошка электродного материала через отверстия ламели («rocket»). Эти процессы часто приводят к внутреннему шунтированию электродов в блоке элемента и преждевременному выходу из строя батареи.

Исторически определились два стандарта бортового напряжения локомотивов: - более старый 64 Вольт и современный – 96 Вольт. Для уровня 96 Вольт свинцово-кислотная батарея содержит 48 элементов, никель-кадмиевая – 72 элемента. Многоэлементная последовательная цепь, с элементами, размещёнными в различных температурных полях (край – центр) также препятствует принципиальной герметизации бортовой батареи.

Срок службы бортовой стартерной батареи локомотива лежит также в широких пределах от 1 года до 5 лет. Критические зоны эксплуатации: районы с холодным климатом, районы с жарким климатом. В вышеуказанном интервале срока службы, более длительная работа поддерживается за счёт регулярного обслуживания батарей на станциях депо, включая замену вышедших элементов цепи на новые.

Немного об экономике использования электрохимических систем. Капитальные затраты на приобретение бортовой батареи возрастают в ряду:

Lead-Acid < Nickel-Iron << Nickel-Cadmium

Как правило, цена никель-кадмиевой батареи для одного и того же типа локомотива в 3 раза превосходит цену свинцово-кислотной батареи.

С другой стороны, эксплуатационные издержки уменьшаются в этом ряду электрохимических систем:

Lead-Acid \approx Nickel-Iron > Nickel-Cadmium

Рассмотрим типичную циклограмму пуска дизеля локомотива (Рис.1). Мощность дизеля - 3000 л.с. Тип используемой батареи: никель-железная, 550 А·ч, напряжение 64 В. Состояние батареи – свежезаряженная (степень заряда \approx 100%). Температура окружающей среды – 26 °С.

Из анализа кривых рис.1 видно, что даже при благоприятных условиях для пуска, падение напряжения на свежезаряженной батарее составило более 40% в начальный момент, при пусковом токе \approx 1930 А. Дизель устойчиво запустился через 8,3 сек.

На рис.2. Приведено изменение мощности снимаемой с батареи в ходе прокрутки дизеля до пуска. Видно, что максимальная разрядная мощность достигает \approx 70 кВт и около 2 сек. удерживается на уровне 40 ... 50 кВт. Общее количество энергии, выведенное с батареи за весь пусковой цикл - 286 кДж, за 3 сек. - 150 кДж, за 2 сек. - 104 кДж.

Для сравнения рассмотрим изменение мощности батареи в ходе прокрутки дизеля при 35% степени заряженности бортовой батареи (Рис.3) на протяжении первых 3 секунд. Видно, что максимальная мощность разряда в пике не превышает 25 кВт, энергия, выведенная за 3 сек. - 67 кДж (Рис.4).

В ходе прокрутки напряжение с 55 Вольт снизилось до 20 Вольт к 16 секунде и пуск не произошел. Степень заряженности батареи 35% - это конечно чрезвычайный случай, но тем не менее довольно часто происходящий, особенно в зимнее время.

Статистические исследования надежности пуска говорят о том, что гарантированность пуска резко падает со снижением степени заряженности бортовой батареи. Зона устойчивого пуска 70-100% степени заряженности, в то время как в эксплуатации реальный диапазон 50-80%.

Анализируя графики Рис.1-4, можно отметить, что для надежного пуска локомотивов с дизелем мощностью 3000 л.с., необходимо иметь батарею, способную выдавать мощность 100-120 кВт в пике, учитывая вариант эксплуатации при пониженных температурах. При этом необходим достаточно жесткий контроль за состоянием заряда бортовой батареи.

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ В ПУСКОВЫХ СХЕМАХ ЛОКОМОТИВОВ.

Электрохимические конденсаторы обладают более высокой, на 1-2 порядка, удельной мощностью, по сравнению со стартерными батареями. Поэтому их можно эффективно использовать на борту локомотива для реализации наиболее мощных процессов – прокрутки вала двигателя в начальный момент пуска.

Существует большое количество технических воплощений применения конденсаторов в пусковых системах. Но в большинстве случаев конденсаторный комплект соединен параллельно с бортовой батареей через контрольно-управляющую схему. Как уже отмечалось в разделе 1 настоящей статьи, возможна легкая реализация алгоритма: «заряд-пуск-отключение» для эксплуатации конденсатора из-за необходимости предстартовой подготовки двигателя.

Принципиальный вид часто применяемой схемы включения конденсатора в пусковую цепь приведен на Рис.6.

Работа схемы.

Во время предстартовой подготовки, конденсаторный комплект С заряжается от батареи В через тиристор VS, открываемый по команде, и через токоограничивающий резистор R для снижения токовой нагрузки для батареи.

Разряд на нагрузку электромашины, т.е. собственно пуск дизеля происходит одновременно для батареи и конденсатора (через диод VD) при замкнутых контактах пусковой цепи К.

После пуска, конденсатор С выводится из зарядной цепи закрытием тиристора VS.

Энергозапас конденсаторного комплекта может варьироваться в широких пределах в зависимости от мощности двигателя и условий эксплуатации. Рассмотрим реальный эксперимент по пуску дизеля мощностью 3000 л.с., описание пуска которого от батареи 550 А·ч приводилось в разделе 2 (4).

Базируясь на данных выведенной энергии в первые секунды пуска можно определить энергозапас конденсаторов в пределах 90 ... 180 кДж.

Был выбран наиболее неблагоприятный случай – степень заряженности бортовой батареи всего 35% и минимальный энергозапас конденсаторов \approx 90 кДж. (Внутренне сопротивление комплекта \approx 10 мОм).

Рассмотрим осциллограмму начала пуска, приведенную на Рис.7. Видно, что разряженная батарея не в состоянии выдать начальный пусковой ток для этого типа дизеля (\approx 2000 А), а всего лишь 610 А. В это же время конденсаторный комплект легко достигает тока 1400 А и суммарно с малым током батареи реализуется нормальное вращение вала двигателя в начале старта.

Преимущества конденсатора даже с минимальным для этого типа дизеля энергозапасом над батареей отчетливо проявляются на 1 секунде запуска, о чём свидетельствуют профили мощности на Рис.8.

Из графиков зависимости выведенной энергии от времени пуска (Рис.9) видно что конденсатор имеет преимущества в первые 1,8 сек, т.е. в момент наибольшей востребованности в энергии. И лишь при переходе в режим долгой стационарной прокрутки батарея выдает больше энергии чем конденсатор.

Следует отметить, что в этом эксперименте произошёл нормальный пуск дизеля на 10 секунде при степени заряженности бортовой батареи всего 35%.

Рассмотрим иной случай применения конденсаторов для пуска двигателей локомотивов (5):

- уменьшенная мощность дизеля 1200 л.с. вместо 3000 л.с.;

- увеличенный энергозапас конденсаторного комплекта – 144 кДж вместо 90 кДж;
- критическое состояние бортовой батареи 100 В, 450 А·ч, но степень заряженности всего 30%;
- неблагоприятные условия пуска – температура окружающей среды +2 °С.

Вначале проводились прокрутки двигателя без пуска от батареи отдельно и от комплекта батарея + конденсатор до автоматического отключения стартерного реле.

Из профиля ток/напряжение (Рис.10) видно значительное падение напряжения – 54% от номинала и невысокий импульсный ток – 876 А, при требуемом 1300-1500 А.

Профиль мощности разряда батареи в начальный период прокрутки показывает пиковую величину ≈ 43 кВт (Рис.11), а величина выведенной энергии (Рис.12) достигает 43 кДж за 1,2 сек, 49 кДж за 1,4 сек.

Полное время прокрутки – 2 сек.

При параллельном подключении комплекта конденсаторов 144 кДж, 15 мОм, 96 В производили его заряд от этой батареи в течение 30 сек. и аналогичную прокрутку. Профиль ток/напряжение (Рис.13) демонстрирует меньшее падение напряжения – 34%, и нормальный импульсный ток на стартере – 1413 А, который сложился из тока батареи – 378 А и тока конденсатора 1035 А.

Таким образом, стартерная батарея в начальный момент пуска разряжалась током менее «1С».

Профиль мощности начального периода прокрутки (Рис.14) показывает почти трёхкратное превышение мощности конденсатора над батареей на участке ≈ 100 миллисекунд.

Суммарная пиковая мощность конденсатора и батареи достигает 94 кВт против 43 кВт в случае только батареи. В отношении выданной энергии, из Рис.15 видно, что конденсатор «обгоняет» батарею в интервале 1,4 сек., выдавая больше энергии на стартер. В этом случае батарея выдаёт только 21 кДж, что более чем в 2 раза меньше, чем при прокрутке только от батареи. Суммарная энергия, выведенная от системы конденсатор – батарея – 47 кДж за 1,2 сек. – чуть больше энергии, выведенной только от батареи.

Однако полное время прокрутки от комбинированной системы увеличилось более чем в 2 раза и составило 4,5 сек., вместо 2 сек. только от батареи.

Дальнейшие испытания предполагали реализацию пуска и при этом отмечалось:

- Пуск только от батареи (степень заряда 30%) – не произошёл;
- Пуск от системы конденсатор + батарея – произошёл устойчиво через 0,5 сек.;
- Пуск только от конденсаторного комплекта – произошёл устойчиво через 0,5 сек.

Последние проведенные эксперименты показывают, что при установленном соотношении: 1200 л.с./144 кДж, участие батареи не обязательно для обеспечения гарантированного пуска локомотивного дизеля.

Дальнейшие исследования привели к разработке и серийному выпуску унифицированной пусковой системы с техническими данными, приведенными в табл.2.

Таблица 2

Параметр		Значение
Тип Системы		СПД 2200/64(96)
1	Мощность запускаемых двигателей	1000 ... 3200 л.с.
2	Номинальное рабочее напряжение	96/64 В
3	Максимальное рабочее напряжение	110 В
4	Номинальный разрядный ток	3500 А
5	Максимальный разрядный ток	10 000 А
6	Полный энергозапас	135 кДж
7	Электрическая ёмкость	26/58 Ф
8	Полное внутреннее сопротивление	< 0,010 Ом
9	Сопротивление изоляции	> 5 МОм
10	Срок службы (циклов заряд/разряд)	> 100 000
11	Масса	< 120 кг
12	Габариты Д x Ш x В	426 x 420 x 545 мм

Система состоит из 3 конденсаторных модулей, включаемых параллельно-последовательно в зависимости от напряжения бортовой сети, зарядного устройства от бортовой батареи, контрольной схемы.

4. СРАВНЕНИЕ, ПРЕИМУЩЕСТВА, НАДЁЖНОСТЬ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ.

Сравнения результаты испытаний и многолетней эксплуатации систем пуска только на батареях и комбинированных систем батарея + конденсатор, можно сделать следующие выводы:

- конденсаторный комплект, работая в паре с бортовой батареей берет на себя все мощностные функции в период максимальной востребованности энергии на стартере (первые секунды пуска двигателя); его мощность в несколько раз превосходит мощность стартерной бортовой батареи;
- энергоотдача на стартер у конденсатора выше чем у батареи в начальный период пуска;
- состояние степени заряженности батареи не влияет на пусковые характеристики;
- батарея не испытывает большой токовой нагрузки при пуске, режим её эксплуатации становится более умеренным;

- отмечается более полное использование энергии пуска: 43 кДж в течение 1,2 сек от батареи вращают вал двигателя лишь 2 сек., пуска не происходит; 47 кДж в течение первых 1,2 сек. от системы батарея + конденсатор вращают вал 4,5 сек. В режиме готовности двигатель запускается за 0,5 сек.

Теперь отметим преимущества комбинированной системы батарея + конденсатор над традиционной пусковой системой на базе только батареи:

- обеспечивается гарантированный пуск локомотивного дизеля при любом состоянии бортовой аккумуляторной батареи, включая эксплуатацию в холодном климате;

- возможен пуск без участия бортовой батареи или с использованием батареи с уменьшенной в несколько раз ёмкостью;

- циклический ресурс электрохимических конденсаторов – сотни тысяч циклов заряд-разряд. Глубина разряда бортовой батареи при работе в паре с конденсатором уменьшается в несколько раз, при этом возрастает её срок службы. Отмечено, что система конденсаторный комплект + батарея эксплуатируется как минимум вдвое дольше;

- примерно в 2 раза уменьшаются издержки по обслуживанию и ремонту бортовой батареи.

Следует отметить, что пусковая стойка конденсаторного комплекта довольно компактное устройство, а то, что конденсаторы герметичны и не требуют никакого обслуживания в течение всего срока службы, даёт возможность размещать конденсаторный комплект в труднодоступных местах в отсеках локомотива. Кроме того, вышеуказанные пункты преимуществ комбинированной системы доказывают её высокую надёжность в эксплуатации, практическую независимость от множества воздействующих факторов.

Экономические аспекты эффективности использования конденсаторов в системах пуска локомотивов основываются на правильном выборе энергозапаса конденсатора, учитывая специфику работы локомотива. Так для маневровых тепловозов желательно иметь больший запас энергии, чем для магистральных локомотивов, т.к. количество остановок в режиме «старт - стоп» для маневровых локомотивов значительно выше. Это относится и к пригородным поездкам с частыми остановками.

Аспекты эффективности использования комбинированных систем можно условно разделить на долгосрочные и краткосрочные.

Долгосрочная экономия определяется за счёт:

- увеличения срока службы системы;

- уменьшения издержек обслуживания.

Общеизвестно, что обслуживаемая батарея за срок службы требует затрат равных или даже превышающих начальную стоимость батареи. Легко подсчитать какая экономия может быть достигнута при увеличении срока службы в 2 раза и снижения издержек обслуживания в 3 раза.

Краткосрочная экономия рассчитывается на основе:

- возможности установки на борту батареи с уменьшенной в 2-3 раза ёмкостью и соответственно уменьшенной ценой;

- при установке конденсаторного комплекта в дополнение к штатной батарее большей ёмкости, экономия достигается за счёт снижения расхода топлива. Т.е. за счёт возможности часто останавливать двигатель с гарантией его последующего пуска. Кроме того, возможно увеличение ресурса двигателя.

Возвращаясь к экономии топлива – за годы эксплуатации комбинированных систем определено, что конденсаторный комплект полностью окупается за 2-4 месяца с начала эксплуатации, исходя из расчёта стоимости топлива и интенсивности эксплуатации.

Следует отметить и недостаток комбинированной системы, правда, не влияющий на надёжность и экономику. Это наличие токоограничивающего резистора в схеме заряда конденсаторных комплектов для снижения броска тока батареи в начальный момент. Невысокая эффективность зарядного процесса, выделение тепла в окружающий отсек. Наилучший выход – использование импульсных преобразователей или ДС/ДС конвертеров. Однако их стоимость в настоящее время экономически не приемлема.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

1. Электрохимические конденсаторы могут быть легко адаптированы в систему пуска локомотивов при работе в любом алгоритме заряда. При этом удельные параметры конденсаторного комплекта не играют определяющую роль.

2. Электрохимические конденсаторы эффективно используются в системах пуска локомотивов, гарантируя пуск двигателя вне зависимости от состояния заряда бортовой батареи и погодных условий, повышая надёжность эксплуатации транспорта.

3. Применение электрохимических конденсаторов экономически эффективно за счёт продления срока службы пусковой системы, снижения издержек на обслуживание бортовой батареи, экономии топлива, повышения ресурса двигателя.

ЛИТЕРАТУРА.

- 1 B.E. Conway, "Electrochemical Supercapacitors Scientific Fundamentals and Technological Applications", 1999, Kluwer Academic Plenum Publishers, № 7.
- 2 A. I. Beliakov, "Investigation and Developing of Double Layer Capacitors For Start of ICE and of Accelerating Systems of Hybrid Electrical Drive", Proc. of "The 6th International Seminar on DLC and Similar Energy Storage Devices", Dec. 9-11, 1996, Deerfield Beach, FL, USA.
- 3 J. R. Miller, "Engineering Battery – Capacitors Combinations in High Power Applications: Diesel Engine Starting", Proc. of "The 9th International Seminar on DLC and Similar Energy Storage Devices", Dec. 6-8, 1999, Deerfield Beach, FL, USA.
- 4 Протокол испытаний по определению эффективности использования комплекта емкостных накопителей энергии в системе пуска тепловоза 2ТЭ10М, АОЗТ «ЭЛИТ»/Курское Локомотивное Депо, июль 1995.
- 5 Протокол испытаний по определению эффективности использования емкостных накопителей энергии в системе пуска двигателя дизель - поезда ДР 1А, АОЗТ «ЭЛИТ»/Локомотивное Депо ст.Гомель, март 1996.

Приложение: Рис.1 – Рис.15.

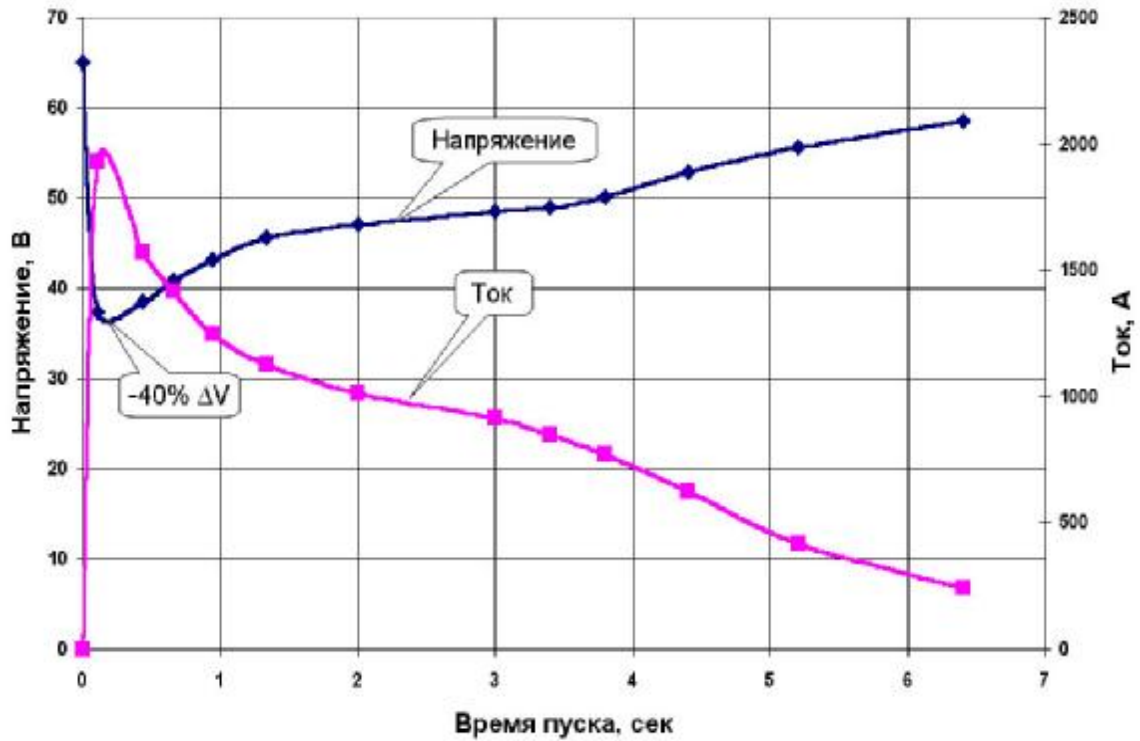


Рис. 1. Профиль ток/напряжение. Батарейный пуск, степень заряженности > 100%; двигатель 3000 л.с., темп. +26 °С. Время прокрутки до пуска – 8,3 сек

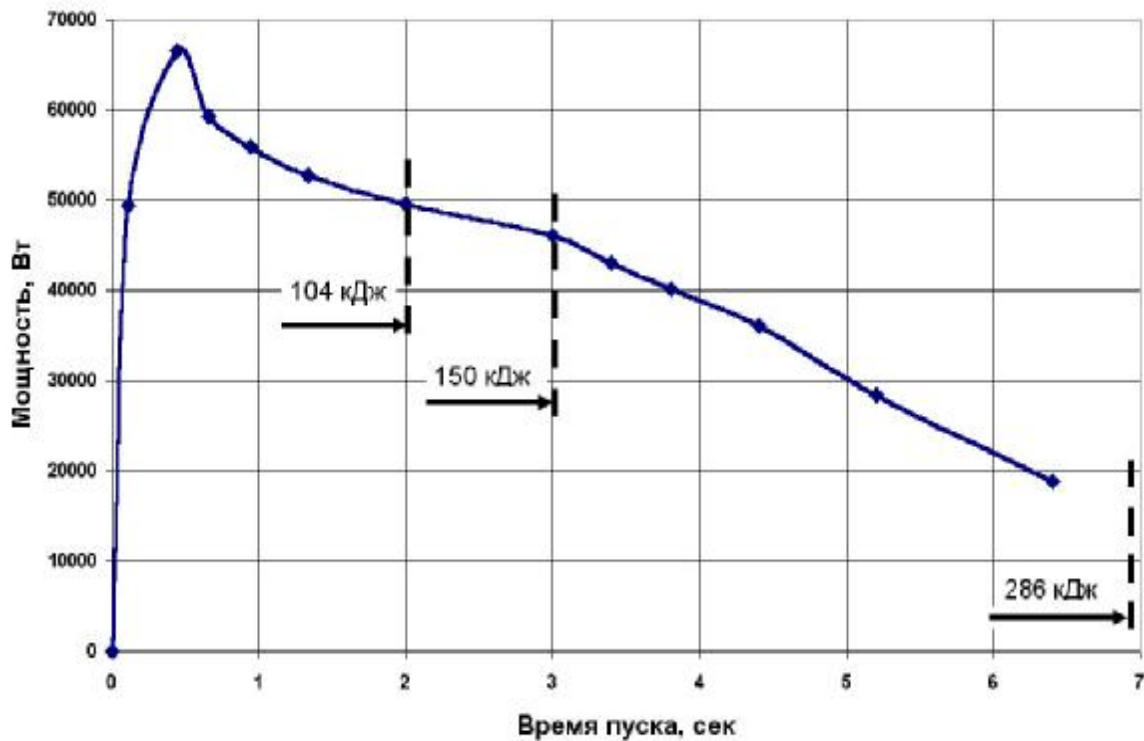


Рис. 2. Профиль мощности стартерного разряда бортовой батареи, степень заряженности > 100%; двигатель 3000 л.с.; темп.. + 26°С.

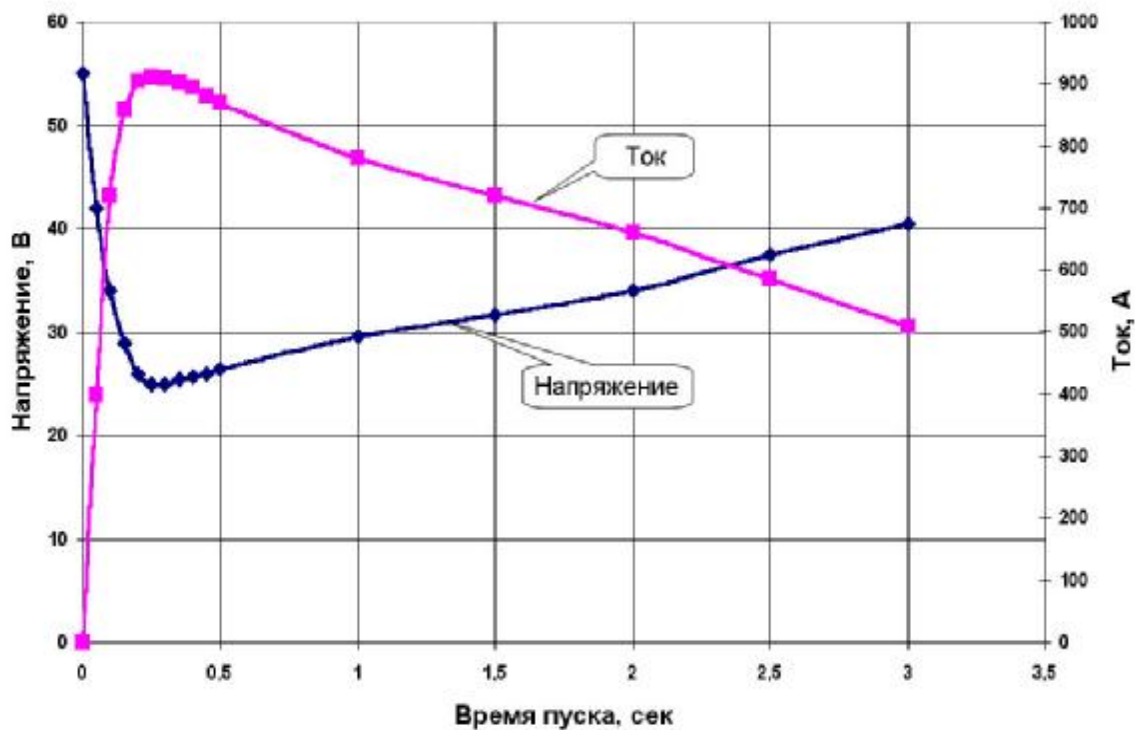


Рис. 3. Профиль ток/напряжение начального момента пуска от батареи, степень заряженности - 35%, двигатель 3000 л.с.

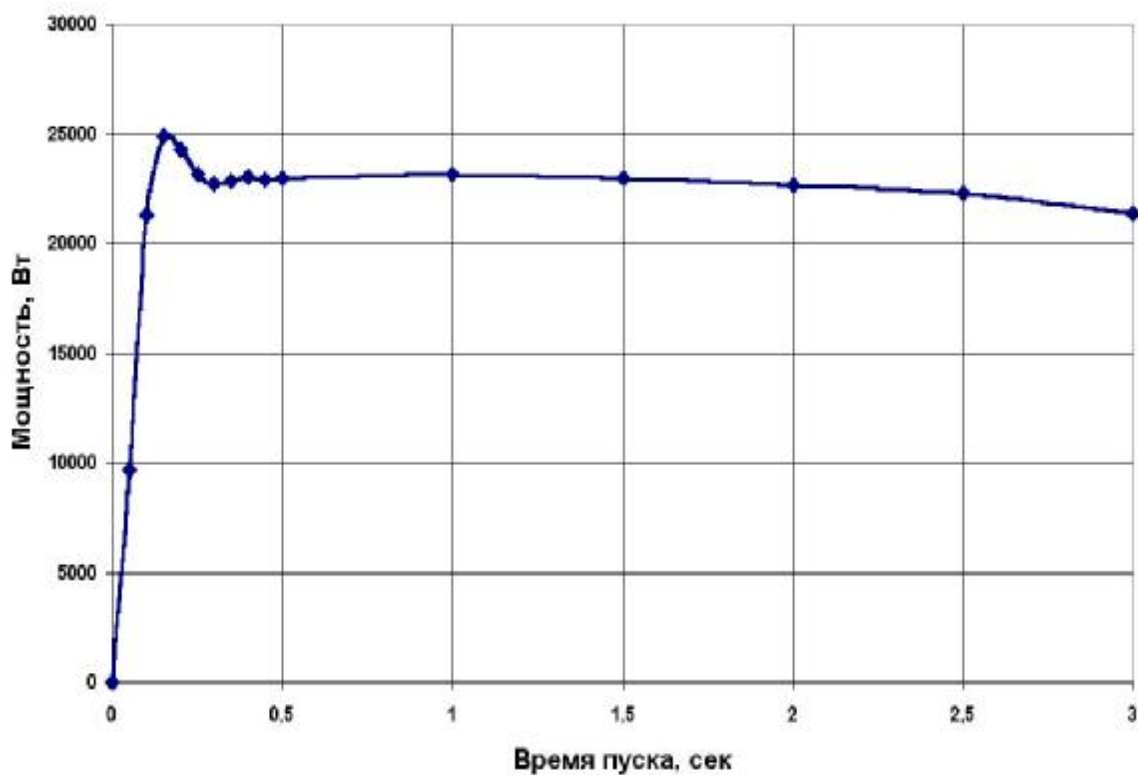


Рис. 4. Профиль мощности стартерного разряда бортовой батареи, степень заряженности - 35%; двигатель 3000 л.с.

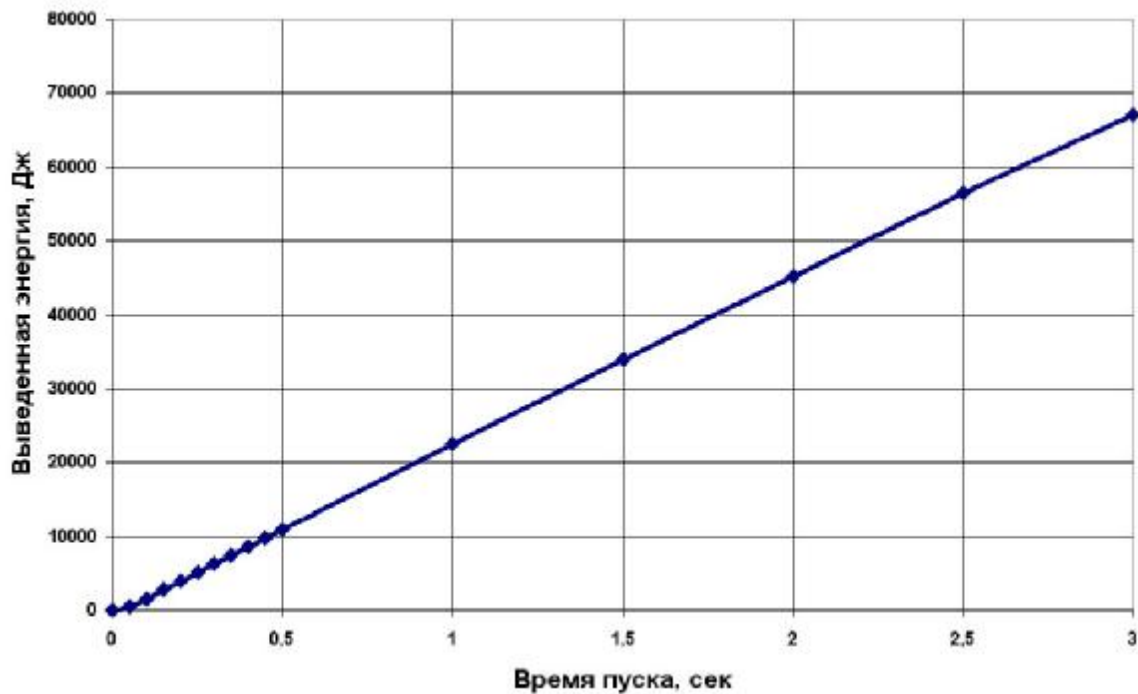


Рис. 5. Выведенная энергия стартерного разряда бортовой батареи, степень заряженности – 35%, двигатель 3000 л.с.

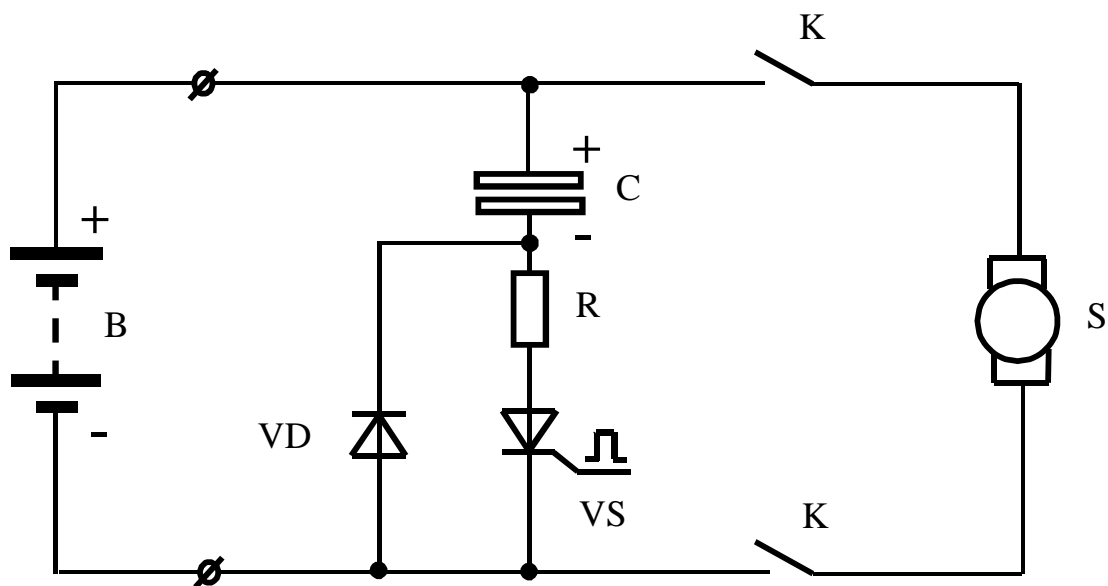


Рис. 6. Схема включения конденсаторного комплекта в пусковую систему тепловоза.

B – бортовая батарея; C - конденсаторы;

S - электромашина/стартер; VD - диод; VS - тиристор;

R – токоограничивающий резистор; К – пусковые контакторы.

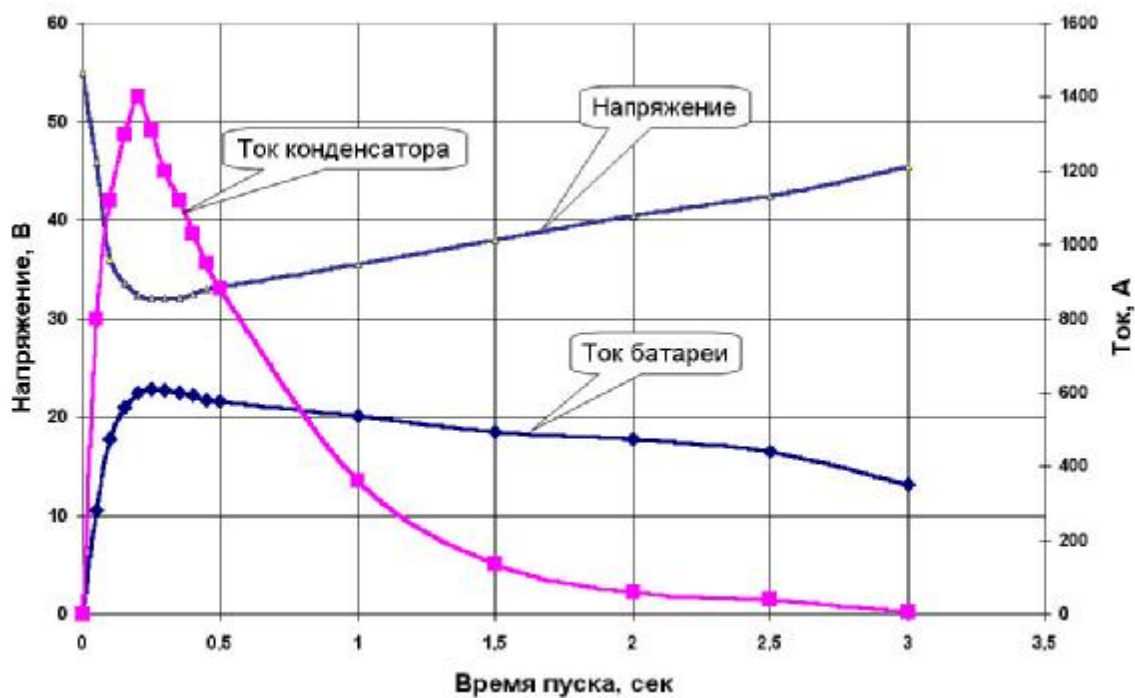


Рис. 7. Профиль ток/напряжение начальной части пуска.
 Степень заряженности батареи - 35%; конденсаторный комплект - 90 кДж; двигатель 3000 л.с.

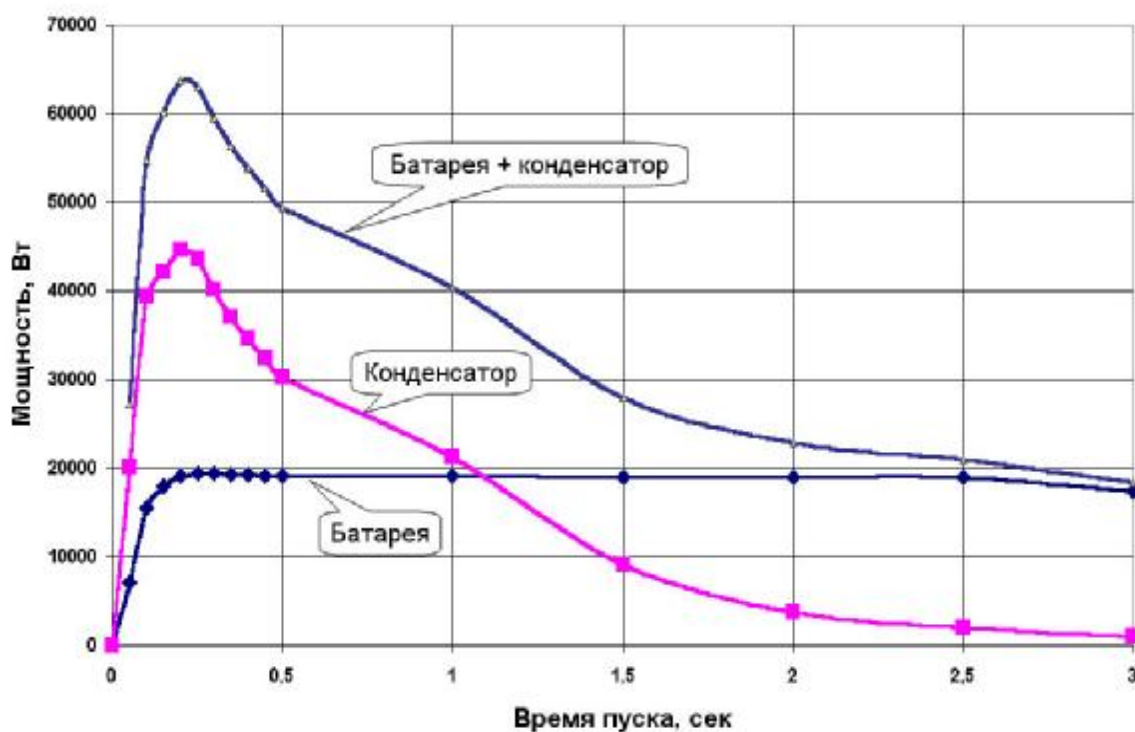


Рис. 8. Профиль мощности начального участка пуска.
 Батарея + конденсатор; степень заряженности батареи – 35%; конденсаторный комплект – 90 кДж; двигатель 3000 л.с.

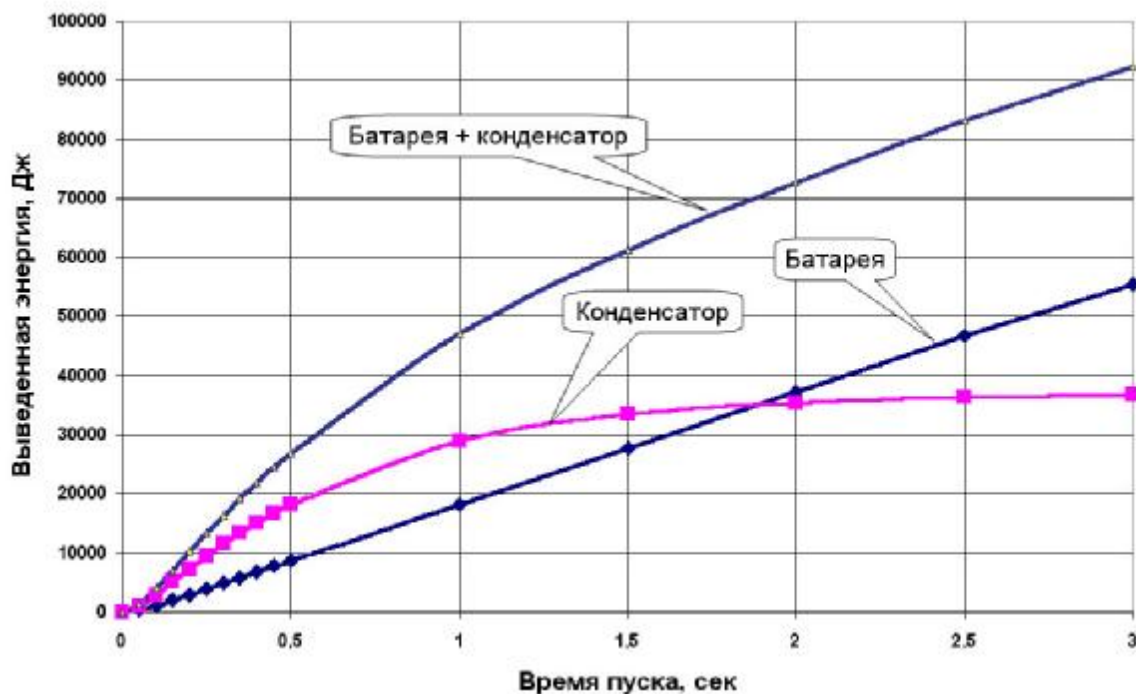


Рис. 9. Выведенная энергия стартерного разряда.
 Батарея + конденсатор; степень заряженности батареи – 35%;
 конденсаторный комплект – 90 кДж; двигатель 3000 л.с.

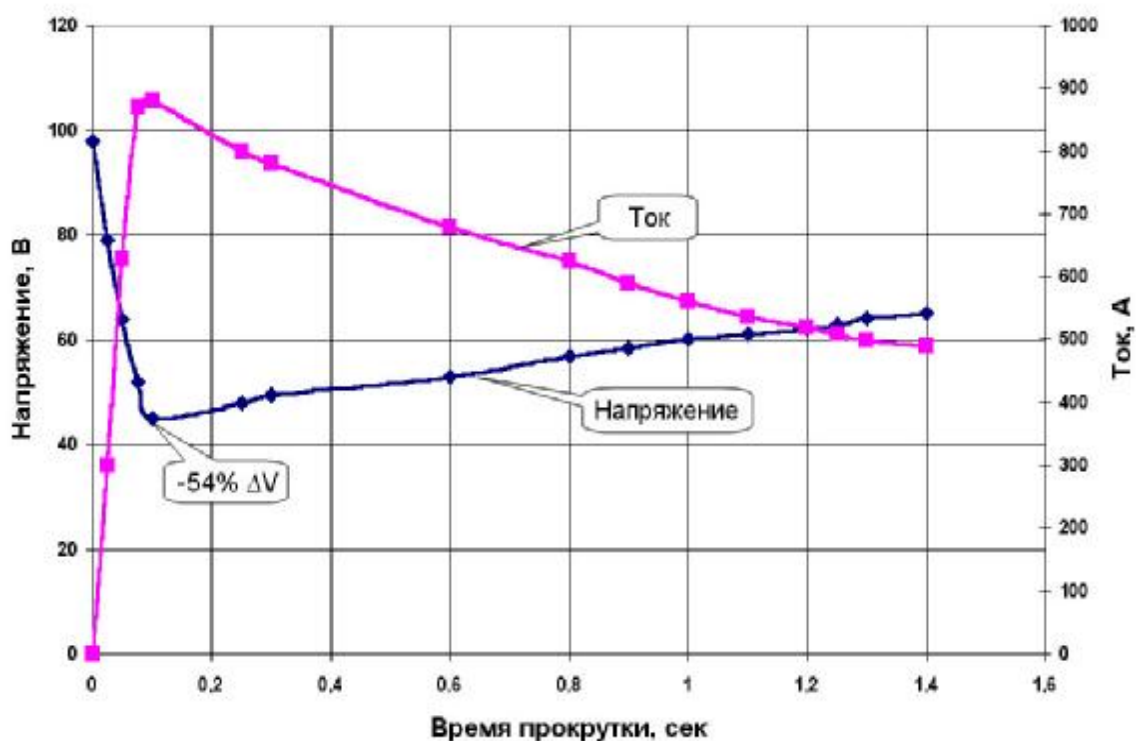


Рис. 10. Профиль ток/напряжение. Начальный период прокрутки только от батареи 450 А·ч, степень заряженности ~ 30 %; двигатель 1200 л.с.; темп. + 2°C.

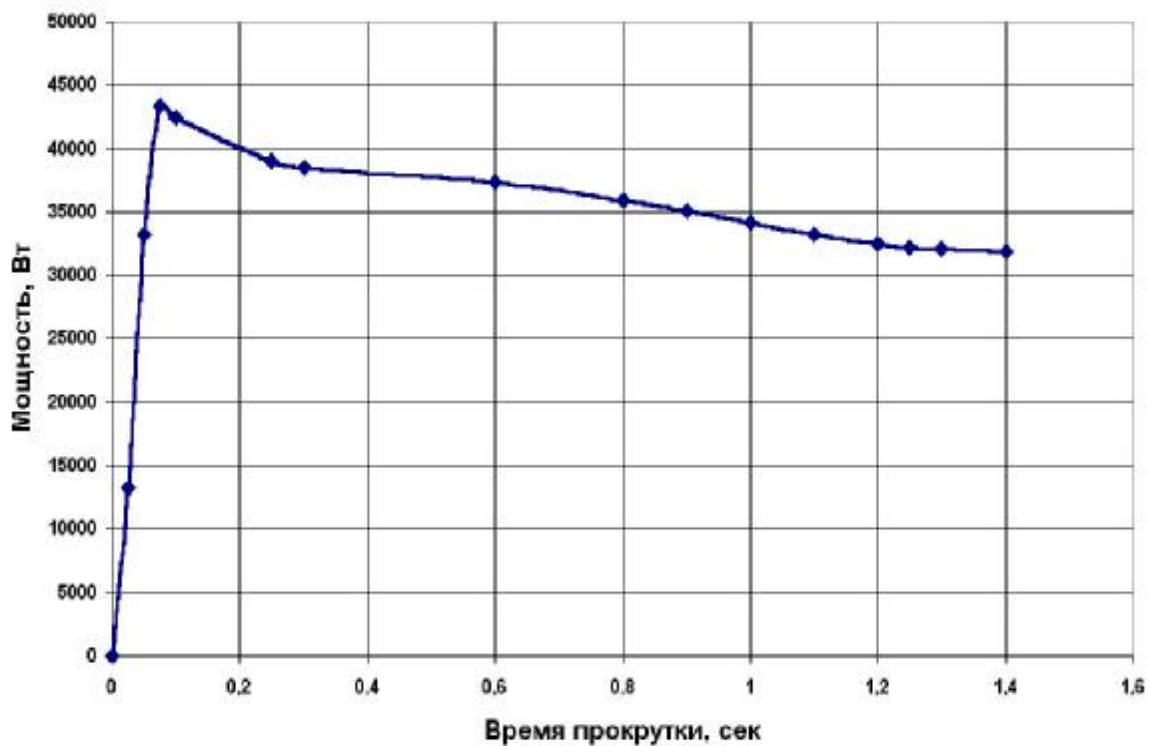


Рис. 11. Профиль мощности, начальный период прокрутки только от батареи 450 А·ч, 96В, степень заряженности $\approx 30\%$; двигатель 1200 л.с.; темп. + 2 °С.

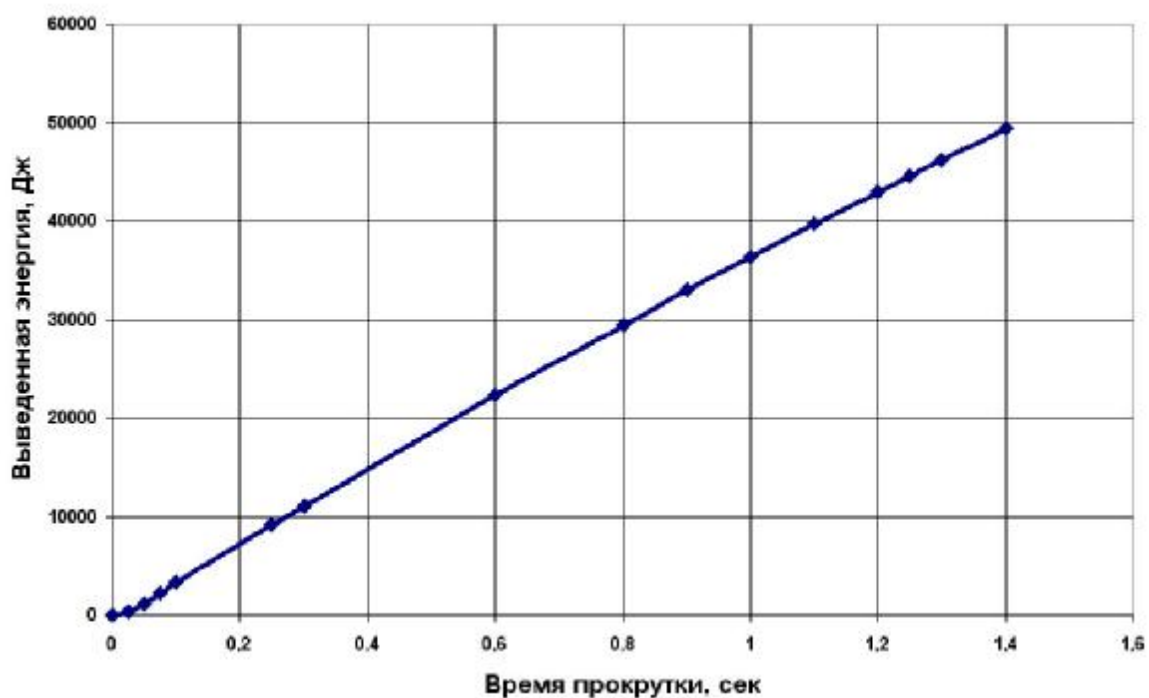


Рис. 12. Выведенная энергия от батареи, степень заряженности $\approx 30\%$; двигатель 1200 л.с.; темп. + 2°С.

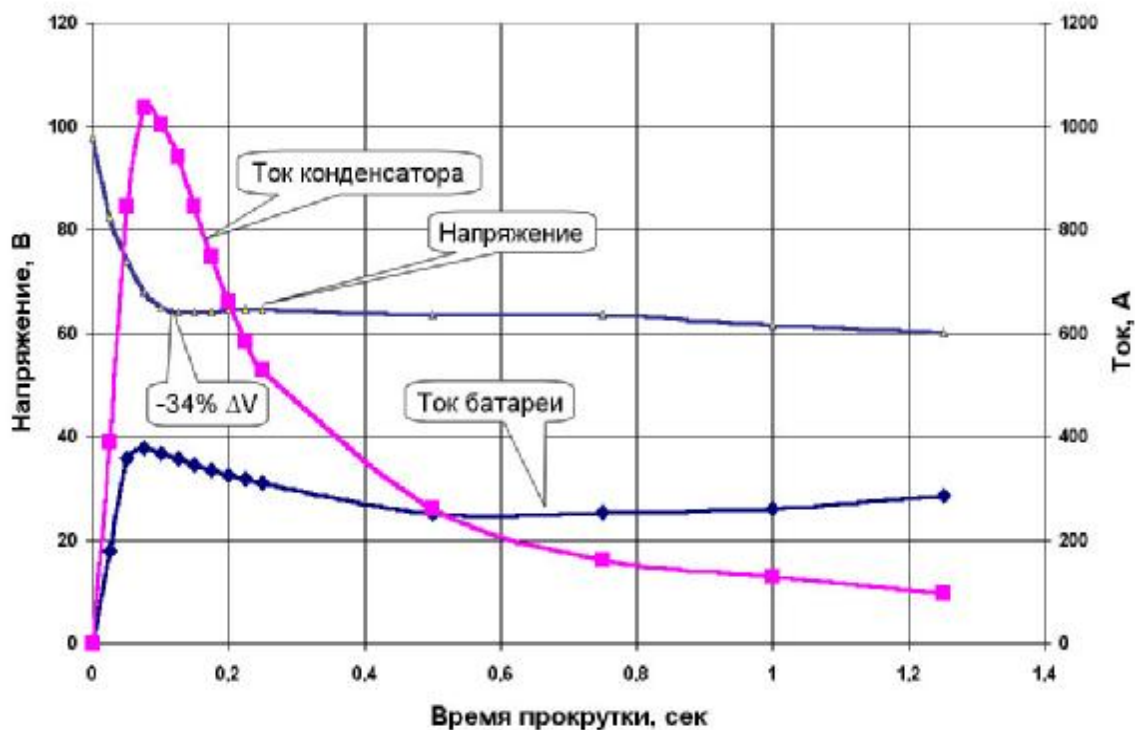


Рис. 13. Профиль ток/напряжение, начальный период прокрутки. Батарея + конденсатор; степень заряженности батареи $\approx 30\%$; конденсаторный комплект - 144 кДж; двигатель 1200 л.с.; темп. $+2^\circ\text{C}$.

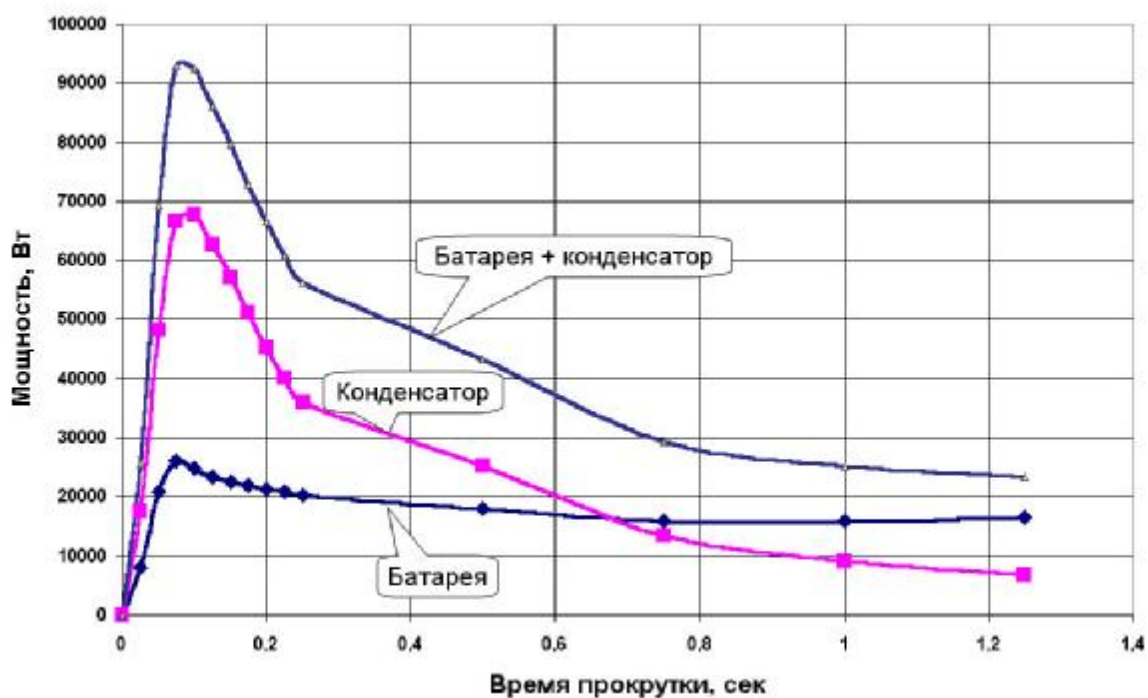


Рис. 14. Профиль мощности начального периода прокрутки. Батарея (заряженность $\approx 30\%$) + конденсаторный комплект 144 кДж; двигатель 1200 л.с.; темп. $+2^\circ\text{C}$.

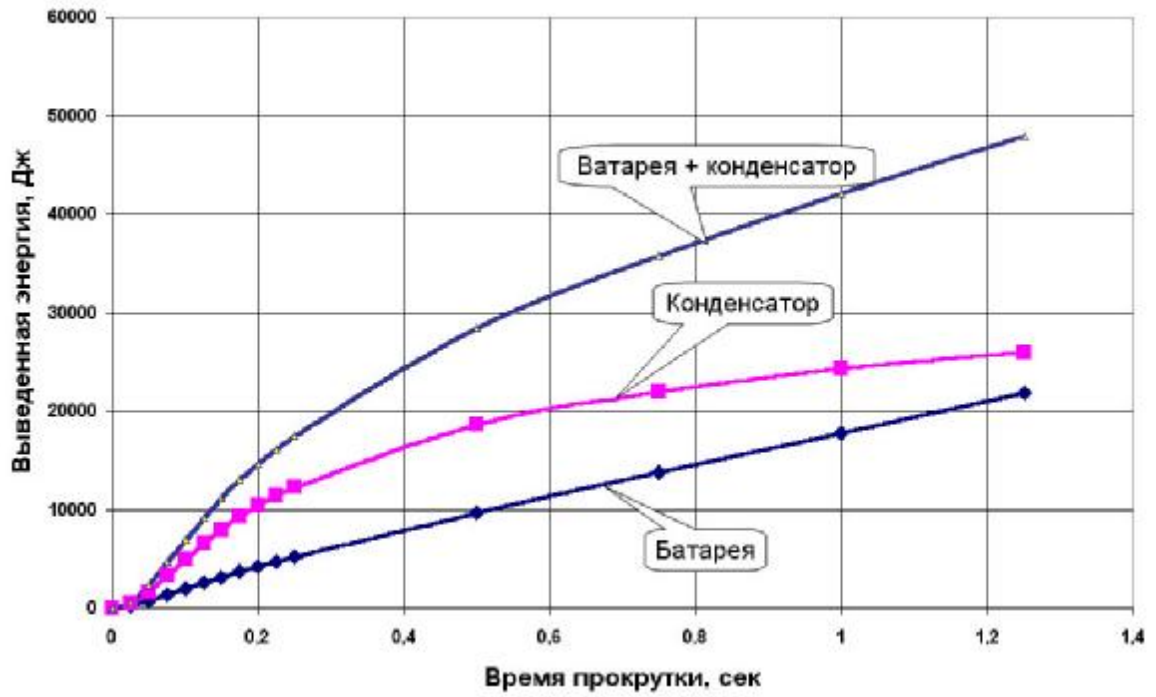


Рис. 15. Выведенная энергия от системы Батарея (заряженность 30%) + конденсаторный комплект 144 кДж; темп. +2°C.