

УДК 621.314.5

РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ПОДДЕРЖКИ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Безденежных И.Б.

Кременчугский государственный политехнический университет

Украина, 39614, Кременчуг, Полтавская обл., ул.Первомайская, 20

E-mail: kafea@polytech.poltava.ua

У даній статті розглянуті умови забезпечення надійного пуску двигуна та розроблений алгоритм адаптивного способу управління тепловим режимом акумуляторних батарей (АКБ). Запропонована структура системи терморегулювання електроліту, підтримки та контролю теплового режиму АКБ.

Ключові слова: електростартерний пуск, тепловий режим, енергобаланс.

The terms of providing the reliable engine's starting are considered and the algorithm of adaptive method for control by the thermal mode of storage batteries is developed. The structure of temperature control system of electrolyte, the support and control of storage batteries thermal mode is offered.

Key words: electrostarters starting, thermal mode, energybalance.

Введение. Надежность запуска автомобильного двигателя в условиях низких температур является проблемой, решение которой возможно за счет использования вспомогательных средств, в том числе, подогрева аккумуляторных батарей (АКБ).

Одной из основных задач при выборе способа управления тепловым режимом аккумуляторных батарей является повышение эффективности электростартерного пуска при сохранении положительного энергобаланса.

Анализ последних исследований. Известный способ поддержки теплового режима аккумуляторных батарей, который позволяет повысить надежность пуска автомобильного двигателя при низких температурах, описан в [1]. Способ осуществляется за счет использования встроенных в аккумуляторную батарею электронагревательных элементов, подключенных к бортовой сети автомобиля через терморегулятор.

К недостаткам данного способа можно отнести жестко заданные пороги регулирования температуры электролита без учета общего состояния системы пуска и сохранения энергетического баланса без возможного ущерба для других потребителей.

Также известен способ поддержки теплового режима аккумуляторных батарей, который осуществляется с помощью внешнего съемного электронагревателя на основе полупроводникового полимера, запрессованного между параллельными проводниками, в котором предельно допустимая температура нагревания автоматически ограничивается за счет изменения собственного сопротивления [2].

При таком способе за счет эффекта саморегулирования подведенной мощности в нагревателе, при изменении температуры электролита, обеспечивается высокая надежность и безопасность эксплуатации автомобиля. Однако проблема обеспе-

чения энергобаланса с учетом одновременного подогрева и зарядки АКБ из-за отсутствия выбора оптимальной температуры для осуществления пуска автомобильного двигателя остается актуальной и в этом случае.

В настоящее время обрабатываются системы пуска с применением молекулярных накопителей энергии, так называемых "ионисторов", характеристики которых не имеют температурной зависимости. Однако в опытных схемах стартерного пуска на базе "ионисторов" [3] АКБ сохраняется как резервный источник питания, поэтому все недостатки, присущие АКБ, сохраняются.

В связи с этим предлагается новое решение проблемы низкотемпературного пуска за счет модернизации системы электростартерного пуска (СЭП) на базе оптимизации тепловых режимов АКБ. Модернизация осуществляется по таким направлениям:

- введение бортовой диагностики технического состояния АКБ, в частности, контроля степени разряда ΔC_r ;

- использование управляемого электроподогрева АКБ по условиям надежного пуска и оценки энергетического баланса.

Введение в систему пуска новых элементов может быть обосновано не только повышением надежности низкотемпературного пуска, но и возможным увеличением сроков эксплуатации АКБ при снижении общей емкости.

Цель работы. Разработка адаптивной модели управления тепловым режимом АКБ для повышения надежности электростартерного пуска и минимизации энергозатрат в условиях низких температур.

Материалы и результаты исследований. В процессе эксплуатации АКБ в составе автомобиля можно выделить два режима.

Режим движения автомобиля характеризуется

необходимостью соблюдения требований по обеспечению положительного зарядного баланса АКБ, без выполнения которого невозможно обеспечить надежный пуск.

В процессе эксплуатации автомобиля, в соответствии с ОСТ37.001.052-2000, система энергоснабжения должна обеспечивать степень зарядки АКБ не менее 75% от номинальной емкости. При снижении температуры электролита по условию зарядки АКБ необходимо повышать напряжение в бортсети автомобиля, а это снижает показатели надежности в работе электрооборудования. Например, по результатам исследований влияния различных факторов на условия эксплуатации и хранения АКБ [4] было показано, что, если принять срок службы аккумуляторной батареи типа 6СТ – 55 за 100% при величине регулируемого напряжения, равного 13,5В, то при напряжении 14,0В срок службы снижался до 87%, а при напряжении 14,5В - уже до 77%.

Таким образом, между процессами зарядки и пуска существует взаимосвязь, основанная на общей зависимости от температурного режима АКБ.

Корректировка температурного режима АКБ за счет применения средств подогрева качественно улучшает условия и зарядки и пуска. Однако отбор дополнительной мощности от генераторной установки на подогрев без принятия специальных мер ведет к нарушению энергобаланса.

В режиме движения автомобиля к специальным мерам можно отнести ограничения по условиям работы других систем электрооборудования, при которых необходимо выполнение следующих требований:

- введение контроля диагностических параметров, таких как температура электролита ($t_{эл}^0$), степень зарядки ($\Delta C_{зар}$) и зарядное напряжение ($U_{зар}$);
- сохранение энергобаланса в части распределения мощности генератора между всеми потребителями;
- минимизация зарядных напряжений по критерию способности принимать заряд;
- снижение уровня регулируемого напряжения для сохранения параметров надежности.

Причем два последних условия выполняются за счет применения в системе энергоснабжения термозависимого регулятора напряжения, предложенного в [5].

В режиме стоянки в качестве критерия для оценки надежного пуска, с учетом установившейся степени зарядки АКБ в процессе эксплуатации автомобильной техники, можно использовать коэффициент отдачи аккумуляторных батарей (η_c), который характеризует ее зарядно-разрядный режим.

Повышение коэффициента отдачи АКБ связано с эффективностью использования активных материалов свинцового аккумулятора и зависит от

условий разряда. При коротких стартерных разрядах за счет увеличения плотности разрядного тока и понижения температуры происходит существенное снижение данного параметра. Такая зависимость рассмотрена в [1] и представлена на рис.1.

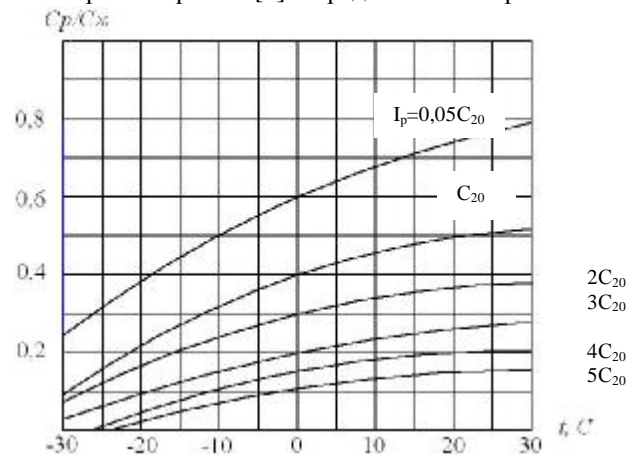


Рисунок 1 – Изменение разрядной емкости АКБ от силы разрядного тока и температуры электролита

Поскольку в режиме стоянки используется внешний источник электропитания, процесс подогрева может происходить без ограничений энергопотребления. При этом, как видно из рис.1, температурный режим АКБ необходимо поддерживать в области положительных значений температур.

Таким образом, задача оптимизации температурного режима АКБ для осуществления надежного пуска при низких температурах должна быть решена с учетом текущей оценки выходных характеристик СЭП и обеспечения условий сохранения энергобаланса системы питания.

Для решения поставленной задачи предлагается в устройствах, обеспечивающих поддержание температуры электролита, вместо жесткого задания пределов регулирования, использовать принцип адаптивности.

Принцип адаптивной поддержки теплового режима АКБ состоит в том, что температура электролита, при которой обеспечивается надежный пуск двигателя, корректируется по текущему значению емкости $C_{тек}$ и действующим условиям пуска в реальном масштабе времени.

Известно, что условия пуска оцениваются «рабочей точкой» на пусковых характеристиках стартера, положение которой определяется пересечением характеристики мощности сопротивления прокручиванию коленвала двигателя с мощностью характеристикой стартера.

Расчет мощности сопротивления двигателя $P_d(M_d)$ производится по характеристикам момента сопротивления двигателя $M_d(n_d)$, полученным экспериментально или расчетным путем, предложенным в [6].

Соединяя рабочие точки для разных температур, можно получить рабочую линию $P_{ст.раб.}(I_{ст.})$, определяющую положение рабочих точек при изменении температуры пуска.

Для оценки выходных параметров СЭП используются параметры рабочих линий мощности, напряжения, тока, момента, частоты вращения. Они показывают, как изменяются основные параметры системы при изменении температуры пуска.

Отмеченные положения используются в расчетных методиках при проектировании и отработке системы электростартерного пуска для новой автомобильной техники.

Для практических целей, например, введения бортового контроля СЭП, в качестве критерия оценки условий пуска предлагается использовать такой параметр, как пусковой ток стартера $I_{ст. пуск}$. Надо отметить, что в номинальном режиме при максимуме мощности стартер работает в пределах от тока при максимальном к.п.д. ($I_{ст.η_{max}}$) до номинального значения тока стартера ($I_{ст.ном}$). Режим пуска характеризуется пусковой мощностью, которую определяют как наибольшую полезную мощность в кратковременном режиме работы при электропитании от батареи, заряженной на 75%, при температуре $-20^{\circ}C$, в конце третьей попытки пуска двигателя с учетом падения напряжения в проводах.

Таким образом, в режиме пусковой мощности рассматриваются граничные условия, на которые ориентируются методики выбора пусковой мощности стартера, например, по обобщенным параметрам вольтамперной характеристики (ВАХ) АКБ [7].

Для оценки промежуточных состояний, возможных в эксплуатации, предлагается под пусковым током стартера $I_{ст.пуск}$, в дальнейшем, подразумевать диагностический параметр, который определяется по максимальному, установившемуся в процессе пуска, значению тока в цепи стартера.

В этом случае $I_{ст.пуск}$ фактически характеризует положение рабочей точки на электромеханической характеристике стартера и принимается за постоянную величину до момента осуществления новых попыток пуска. Определить значение $I_{ст.пуск}$, не прибегая к стационарному диагностированию, можно по падению напряжения на электрокабеле «стартер – АКБ».

Известно, что электромеханические характеристики стартера зависят от вольтамперных характеристик АКБ.

Для анализа режима стартерного разряда на семействе ВАХ по обобщенным показателям разрядных характеристик батарей различного типа и при различных температурах электролита были использованы экспериментальные материалы, полученные в [7].

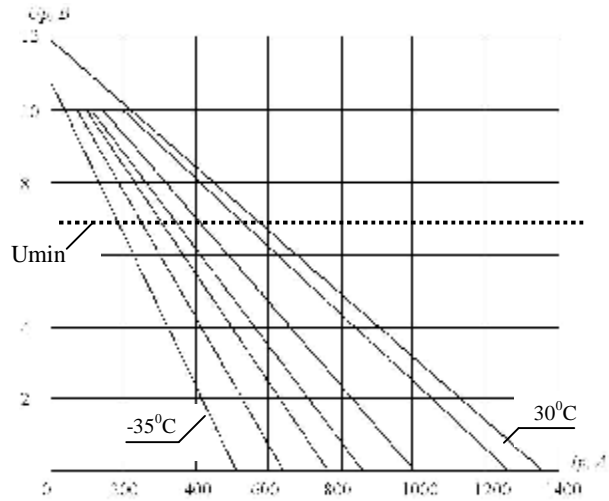


Рисунок 2 – Вольтамперные характеристики батарей 6СТ-55А

При пересчете экспериментально полученных разрядных вольтамперных характеристик АКБ для разных температур электролита по минимально допустимому напряжению при пуске двигателя, как показано на рис.2, можно получить зависимость вида $I_{ст.пуск} = f(t_{эл}^0)$ для заданной степени разрядки ΔC_p .

Для различных значений ΔC_p можно получить семейство зависимостей указанного вида (рис.3).

Благодаря полученным зависимостям, по значению измеренного $I_{ст.пуск}$, можно определить оптимальную температуру электролита $t_{эл.опт.}^0$, необходимую для осуществления гарантированного повторного пуска двигателя на текущий момент.

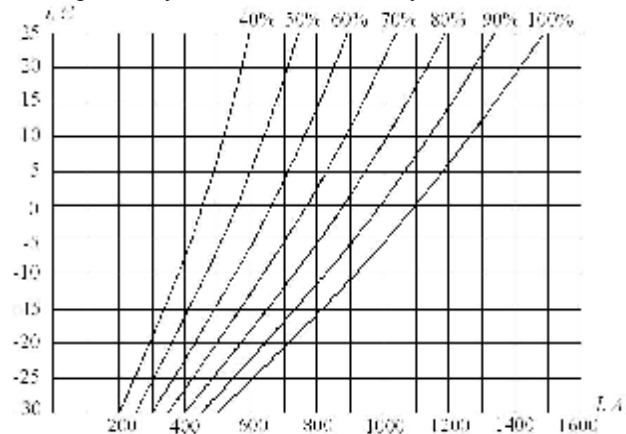


Рисунок 3 – Семейство зависимостей $I_{ст.пуск} = (t_{эл}^0)$ для аккумулятора типа 6СТ-190А

В случае реализации такого предложения поддержания температуры электролита обеспечивается на расчетном уровне без лишних энергозатрат, поэтому тепловой режим АКБ можно считать оптимизированным.

Для проведения расчетных операций с использованием программных средств полученные зависимости могут быть приведены к табличным данным (табл.1).

**Таблиця 1 –
Температура електроліта АКБ**

$C, \%$ I, A	40	50	60	70	80	90	100
400	-7,3	-15,9	-22,1	-26,5	-29,8	-	-
600	-	5,2	-5,6	-12,5	-17,9	-22,1	-25,2
800	-	-	14,4	2,7	-5,3	-11,2	-15,5
1000	-	-	-	21,0	9,2	0,7	-5,4
1200	-	-	-	-	-	14,5	6,2
1400	-	-	-	-	-	-	19,1

При помощи программы Mathcad 2001 табличные данные были интерполированы и приведены к уравнению вида :

$$t(C, I) = \left(\frac{-91}{10} \cdot I - \frac{6031}{24} \cdot C + \frac{3}{2 \cdot 10^4} \cdot C^3 \cdot I - \frac{343}{24 \cdot 10^3} \cdot C^2 \cdot I + \frac{1193}{2 \cdot 10^3} \cdot C \cdot I - \frac{757}{12 \cdot 10^3} \cdot C^3 + \frac{14413}{2400} \cdot C^2 + \frac{59}{24 \cdot 10^4} \cdot C^4 - \frac{7}{12 \cdot 10^6} \cdot C^4 \cdot I + 3844 \right)$$

Это позволяет выполнять необходимые расчеты без дискретной формы представления информации.

График функции, построенный при помощи Microsoft Excel, показан на рис.4.

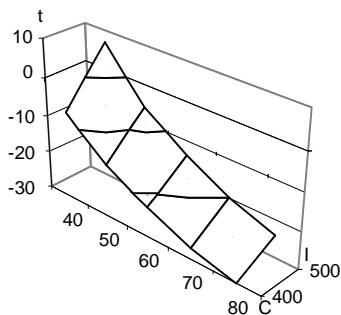


Рисунок 4 – График зависимости $I_{ст.пуск} = f(t_{эл}^0)$ для заданной степени разрядки ΔC_p

Разработанный алгоритм адаптивной поддержки теплового режима АКБ представлен на рис.5.

Функционирование системы поддержки теплового режима АКБ (СПТРА) начинается с подачи напряжения питания и выбора по состоянию “замок зажигания” одного из двух вариантов режима подогрева.

На стоянке автомобиля при установке “замок зажигания” в соответствующее положение подогрев АКБ осуществляется от внешней сети 220В без контроля и ограничения потребления электро-

энергии. В этом режиме, с учетом неизменной емкости АКБ, как было показано, надежный пуск двигателя может быть обеспечен за счет улучшения коэффициента отдачи АКБ при повышении температуры электролита. При этом максимальное значение температуры не ограничивается, т.к. нагреватели на основе полупроводникового полимера имеют свойство саморегулирования подведенной мощности. Поэтому изменения температуры при установившихся процессах в тепловой системе “нагреватель - АКБ” не превышают границ безопасной эксплуатации [8].

При общей работе с другими автоматизированными системами тепловой подготовки двигателя для экономии затрат электроэнергии период работы нагревателей АКБ может быть ограничен временем предвыездной подготовки за счет применения таймерной установки.

В движении автомобиля при установке “замок зажигания” в положения «СТ» осуществляется тестирование тока стартера $I_{ст.пуск}$ в момент запуска двигателя, а также текущего значения остаточной емкости $C_{тек}$.

Возможность включения нагревателей определяется из условий завершения теплообменных процессов зарядки АКБ и возможности послестартовой зарядки АКБ без ущерба для других потребителей с целью сохранения энергобаланса. Признаком завершения указанных процессов можно считать стабилизацию тока заряда, при которой $\frac{dI_z}{dt} = 0$. В случае выполнения упомянутого

условия нагреватели включаются в бортовую сеть автомобиля, и начинается тестирование температуры электролита - $t_{эл}^0$, а если не выполняется - включение нагревателей блокируется.

Как уже отмечалось, пуск и зарядка являются взаимосвязанными процессами, поскольку при снижении температуры электролита уменьшается не только разрядная емкость, но и одновременно возможность приема заряда. Поэтому с точки зрения разработки алгоритма управления процессом подогрева возникает вопрос о том, какие условия должны быть обеспечены в первую очередь, т.е. вопрос о приоритетах. Это могут быть условия зарядки, т.к. при восстановлении емкости улучшаются возможности пуска или, если исходить из того, что АКБ для комплектации автомобиля выбирается со значительным запасом по емкости, подогрев необходим для повышения коэффициента отдачи батареи.

В разработанном алгоритме СПТРА используется компромиссное решение.

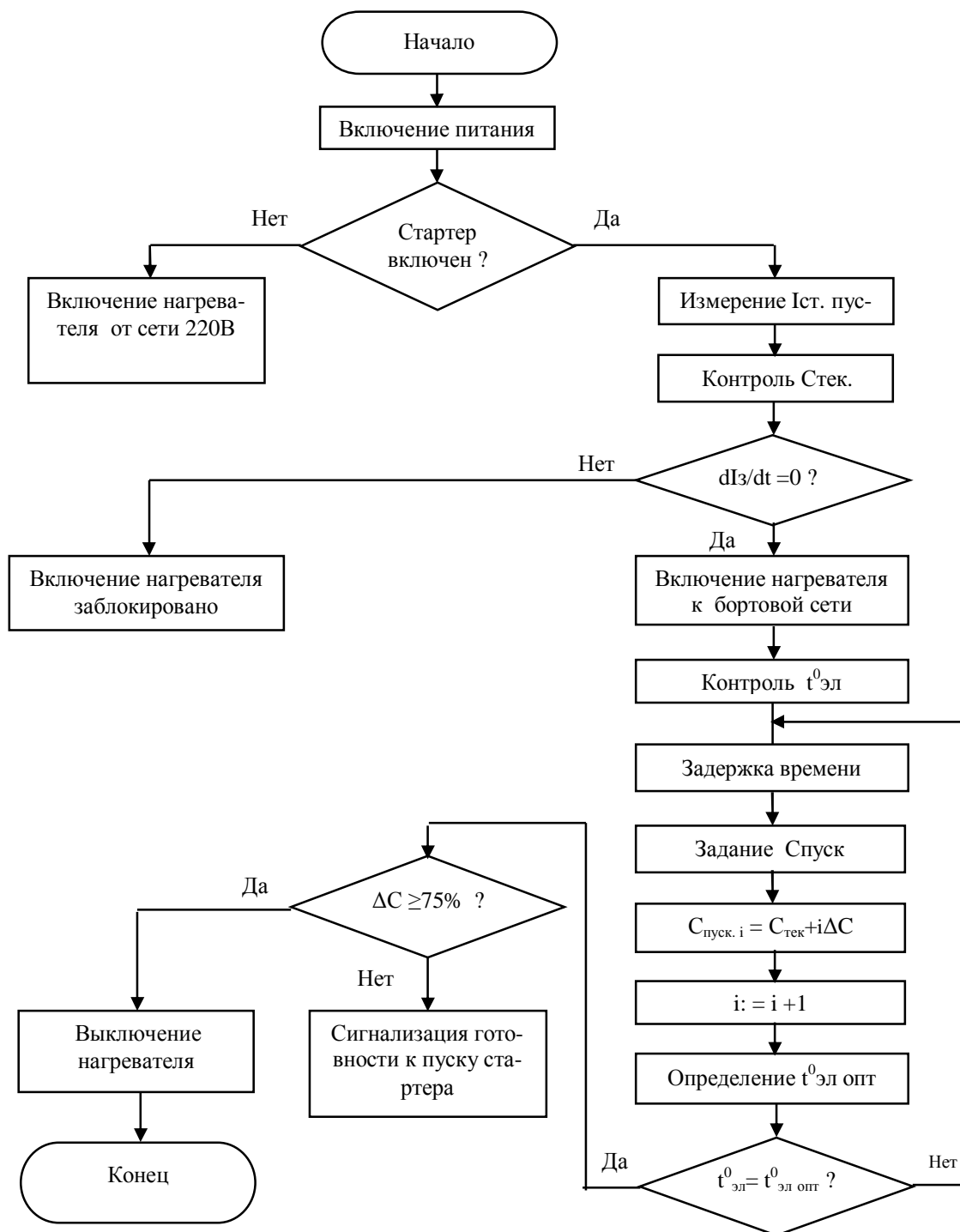


Рисунок 5 – Алгоритм адаптивной поддержки теплового режима АКБ

В продолжении переходных процессов после пуска двигателя нагрев отсутствует, а далее нагрев контролируется по расчетной температуре в соответствии с текущей емкостью. Последующий пересчет температуры выполняется при достижении нового заданного значения емкости.

Таким образом осуществляется привязка температурного режима к зарядным процессам.

С этой целью в алгоритме управления предусмотрена задержка времени, в течение которой происходит отслеживание изменения емкости

АКБ. Если ее новое значение определяется как $C_{тек} + \Delta C$, выполняется вычисление температуры $t_{эл. опт}^0$, на которую необходимо вывести тепловой режим АКБ для осуществления повторного пуска.

В случае, если при контроле не подтверждается выполнение условия $t_{эл}^0 = t_{эл. опт}^0$, производится новый пересчет $t_{эл. опт}^0$ для пускового значения емкости $C_{пуска} = C_{тек} + i\Delta C$, где i - количество попыток пересчета до выхода заряда АКБ на уровень 75% от номинальной емкости.

Таким образом реализуется принцип адаптивной модели управления СПТРА .

Если условие $t_{эл.}^0 = t_{эл. опт}^0$ выполняется, а емкость АКБ не превышает $0.75C_{ном.}$, на панель приборов выдается диагностический сигнал “готовности к пуску”, при этом нагрев продолжается для обеспечения условий зарядки АКБ. Если емкость АКБ достигает уровня $0.75C_{ном.}$, нагреватели отключаются.

Известно, что при выборе номинальной емкости АКБ на комплектацию автомобилей для обеспечения гарантированного пуска при низких температурах, все необходимые расчеты выполняются с запасом по емкости [9], что неизбежно ведет к проблемам выполнения энергобаланса.

Положительный эффект от использования предложенной адаптивной модели управления состоит в том, что поддержка теплового режима аккумуляторных батарей реализуется с минимальным энергопотреблением, а надежный пуск двигателя в условиях низких температур может быть обеспечен при меньших значениях емкости АКБ.

Выводы.

1. Проведено исследование необходимых условий для обеспечения надежного пуска в двух режимах эксплуатации автомобиля - движении и на стоянке.

2. Предложены критерии оценки пределов регулирования температуры электролита АКБ для различных режимов эксплуатации, что дает возможность адаптировать процесс поддержки температурного режима АКБ.

3. Приведены результаты математического моделирования тепломассоразрядных процессов в АКБ при электростартерном пуске.

4. Разработан алгоритм адаптивного управления регулирования температуры электролита АКБ.

5. Предложена новая структура системы поддержки и контроля теплового режима АКБ с введением нового диагностического параметра “готовность к пуску”.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

1. Чижков Ю.П., Акимов А.В. Электрооборудование автомобилей. - М.: За рулем, 1999.- 384 с.

2. Декларационный патент на корисну модель UA14347, H01M10/42. Спосіб полегшення “холодного пуску” автомобільного двигуна за рахунок підігріву акумуляторних батарей / Безденежних І.Б., Безденежних Л.А.; опубл. 15.05.06. Бюл.№5.

3. Патент SU 1193288 А, МКИ F02N 11/08. Система электростартерного пуска двигателя внутреннего сгорания / Фесенко М.Н., Чижков Ю.П., Хортов В.П.; опубл. 23.11.85. Бюл.№43.

4. Ютт В.Е., Гольдштейн О.С. Диагностика электрооборудования автомобилей: Обзор /НИИНавтопром; В.Е. Ютт, О.С. Гольдштейн.- М.:НИИНавтопром, 1971.- 56 с.

5. Патент на корисну модель UA18024, H02J7/04. Пристрій регулювання напруги автомобільного генератора / Безденежних І.Б., Фомовська О.В.; опубл. 16.10.06. Бюл.№10.

6. Боровских Ю.И., Гутенев Н.И. Электрооборудование автомобилей.- К.: Выща школа, 1988.- 168 с.

7. Безденежных И.Б., Луговая О.В. Исследование возможности применения обобщенных параметров вольтамперной характеристики аккумуляторных батарей для оценки пусковой мощности стартеров // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету.- Вип.6/2005(35).- С.88-91.

8. Безденежных И.Б., Фомовская Е.В. Исследование возможности и условий применения наружных электронагревателей для подогрева аккумуляторных батарей // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету.- Вип.1/2006(37). С.37-40.

9. Боровских Ю.И., Фещенко А.И. Расчет номинальных параметров стартера и аккумуляторной батареи для заданных условий пуска холодного двигателя. // Труды МАДИ.- 1977.- Вып.132.- С.30-39.

Статья поступила 25.01.2007.

Рекомендовано к печати к.т.н., доц.

Мосьпаном В.О.