

Представлено алгоритм управління одиницями обладнання для спалювання палива зі змінною калорійністю в парових котлах типу ДКВР-20-13. Наведено критерій для вибору оптимального керуючого алгоритму, що знаходиться методом динамічного програмування. На підставі проведених досліджень запропоновано оптимальний алгоритм роботи обладнання в залежності від загального навантаження трьох котлів

Ключові слова: керуючий алгоритм, узагальнений критерій, метод динамічного програмування, несертифіковане паливо

Представлен алгоритм управления единицами оборудования для сжигания топлива с различной калорийностью в паровых котлах типа ДКВР-20-13. Приведен критерий для выбора оптимального управляющего алгоритма, который находится методом динамического программирования. На основании проведенных исследований предложен оптимальный алгоритм работы оборудования в зависимости от общей нагрузки трех котлов

Ключевые слова: управляющий алгоритм, обобщенный критерий, метод динамического программирования, несертифицированное топливо

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМА РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Т. С. Добровольская

Аспирант

Кафедра автоматизации

теплоэнергетических процессов

Одесский национальный

политехнический университет

пр. Шевченко 1, г. Одесса, Украина, 65044

E-mail: dobrusha88@mail.ru

1. Введение

В настоящее время на нефтеперерабатывающих заводах уделяют большое внимание сжиганию смеси газов, полученных от технологических установок, в качестве топлива. Такое топливо применимо для выработки пара в паровых котлах. Пар, полученный из паровых котлов, поступает на ректификационную колонну для получения бензина и других продуктов нефтепереработки.

Использование такого топлива позволяет не только снизить потребление сертифицированного (покупного) топлива, а, как следствие, и материальных затрат предприятия, но также и снизить вредные выбросы в окружающую среду. Следует заметить, что эффективность сжигания топлива в паровых котлах зависит от постоянной калорийности топлива [1]. Так как смесь газов, поступающая на вход парового котла, получена в результате смешения уходящих газов с различных технологических установок, работающих на разных режимах, то и калорийность смеси газов переменна. Следовательно, возникает проблема эффективного сжигания топлива с переменной калорийностью.

2. Анализ литературных источников

Следует заметить, что существует множество других способов сжигания топлива. Наиболее распространенными считаются генетический алгоритм и метод динамического программирования. Генетический ал-

горитм позволяет прогнозировать решение случайным образом. Его использование встречается в энергетике при проектировании работы солнечной батареи [3] и системы теплоснабжения [4]. Подобный метод позволяет не только прогнозировать, но и сократить время расчета принятого решения, но не учитывает истории принятых решений.

Выбор оптимального пути методом динамического программирования Беллмана основывается на истории ранее принятых решений. Метод Беллмана применим в сетевых технологиях (применения метода для восстановления услуги сети) [5]. Оптимальный путь решения заключается в выборе оптимального пути из всех существующих, которые служат основой для восстановления после отказа. Также метод применим в многоцелевой оптимизации [6].

Большое внимание также уделяют сжиганию водорода, т. к. сжигание водорода позволяет сократить выбросы вредных веществ в окружающую среду. Для сжигания чистого водорода потребуются реконструкция оборудования и труб. В работе [7] представлен метод смешанного целевого нелинейного программирования, который осуществляет выбор топливного элемента. В данной работе используется водород, полученный путем непрерывной очистки уходящих газов. Использование данного метода позволяет не только сэкономить потребление сертифицированного газа, но и получать прибыль. В работе [8] представлено сжигание мазута и природного газа на нефтеперерабатывающем предприятии. При сжигании природного газа, природный газ был частично заменен смесью

газов с высоким содержанием водорода. Данная смесь является побочным продуктом операций каталитического риформинга и каталитического крекинга. Исследование, выполненное в данной работе, показало, что использование природного газа и смеси газов с высоким содержанием водорода в определенном соотношении позволяет сократить потребление энергии, а также снизить выбросы в окружающую среду.

Процесс сжигания топлива учитывает различные факторы, один из которых – постоянство калорийности газа. Сжигание топлива зависит от подачи воздуха. Неверное соотношение топливо-воздух может привести к химическому недожогу топлива, что приводит к вредным выбросам в окружающую среду, либо к полному сгоранию топлива, что приводит к охлаждению топочной камеры, и, как следствие, к охлаждению потерь с уходящими газами [9].

Из анализа литературных источников видно, что сжигание смеси газов, полученных от технологических установок, позволяет снизить потребление сертифицированного топлива, тем самым сэкономить материальные затраты предприятия.

3. Цель и задачи исследования

На нефтеперерабатывающих заводах для разделения нефти на нефтепродукты, такие как бензин, дизельное топливо, на ректификационную колонну подается пар. Пар вырабатывают паровые котлы, предназначенные для работы на сертифицированном газе.

Пуск парового котла осуществляется на сертифицированном газе (метане). При режимной работе оборудования в качестве топлива используется как сертифицированное, так и несертифицированное топливо. Несертифицированное топливо поступает от газовых коллекторов, куда сбрасываются газы от технологических установок, полученные путем перегонки нефти. А именно в результате получения нефтепродуктов образуются углеводородные газы. В процессе каталитического риформинга и каталитического крекинга образуются смеси газов с высоким содержанием водорода, и, как следствие, с большой калорийностью.

При режимной наладке паровых котлов одним из основных условий является постоянство калорийности поступающего топлива. В общем случае добиться выполнения данного условия в результате сбора газов с технологических установок крайне сложно, т. к. технологическое оборудование, от которого газ сбрасывается в газовый коллектор, работает в различных переменных режимах, а, следовательно, и калорийность данного газа переменна.

В работе [2] показан разброс плотностей газа относительно эталонного, что может привести к снижению выработки пара.

В качестве примера рассмотрим паровые котлы типа ДКВР-20-13, работающие на один паропровод. На вход котлов одновременно может поступать сертифицированное топливо (природный газ), или несертифицированное топливо (газы, полученные от технологических установок). Схема установки прилагается (рис. 1).

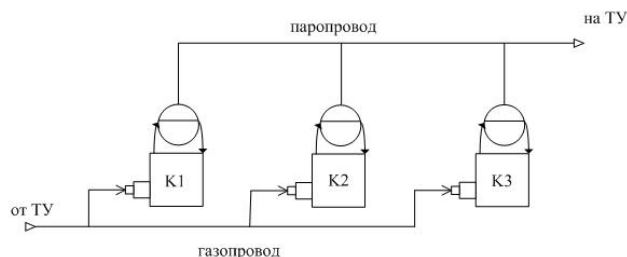


Рис. 1. Схема установки котлов, работающих на один паропровод

Калорийность несертифицированного топлива изменяется в пределах от 11300 до 18707 ккал/кг. Для рассмотрения будут приниматься газы с граничными значениями. В качестве смеси газов используются водородсодержащий газ с плотностью 0,718 кг/м³ и калорийность 18707 ккал/кг, а также углеводородный газ с плотностью 1,884 кг/м³ и калорийностью 11300 ккал/кг. Оба газа будут сопоставляться сертифицированному газу (метану) с плотностью 0,716 кг/м³ и калорийностью 8500 ккал/кг.

Минимальная нагрузка котла составляет 40 %. В табл. 1 приведены возможные комбинации работы трёх котлов на общую нагрузку.

Таблица 1

Комбинации работы трёх котлов на общую нагрузку

Комбинация/общая нагрузка, %	I	II	III
40	40/-/-	40/-/-	40/-/-
60	60/-/-	60/-/-	60/-/-
80	40/40/-	40/40/-	80/-/-
100	50/50/-	50/50/-	60/40/-
120	40/40/40	60/60/-	80/40/-
140	46/47/47	50/50/40	80/60/-
160	53/53/54	60/60/40	80/80/-
180	60/60/60	70/70/40	90/90/-
200	67/67/66	80/80/40	100/100/-
220	73/73/74	90/90/40	100/80/40
240	80/80/80	90/90/60	100/100/40
260	86/87/87	90/90/80	100/100/60
280	93/93/94	100/100/80	100/100/80
300	100/100/100	100/100/100	100/100/100

В табл. 1 представлено изменение общей нагрузки работы трех котлов от 40 до 300 % с шагом 20, а также три возможные комбинации переключения котлов. Принцип первой комбинации I представляет собой равномерную нагрузку трех котлов. Вторая комбинация II представляет равномерную работу двух котлов и один резервный. А третья комбинация III – работает по принципу максимальной нагрузки котла.

Следует учесть, что паровой котел, работающий на сертифицированном топливе, выработает 20 тонн пара в час на 80% нагрузке котла. По предварительным расчетам производительность парового котла на несертифицированном топливе составит для углеводородного газа – 30,08 т/ч, водородсодержащего газа – 10,77 т/ч. Результаты суммарной выработки пара G при разных нагрузках трех котлов сведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что для производства 40 т/ч понадобится использовать два котла, работающих на

сертифицированном топливе, или полная выработка трёх котлов, работающих на водородсодержащем газе. Для углеродного газа достаточно будет использование одного котла на больших нагрузках. Максимальная паропотребление завода составляет 51 тонн пара в час в зимний период и 29 тонн пара в час в летний период.

Таблица 2

Таблица суммарной выработки трёх котлов при различных нагрузках

Суммарная нагрузка, %	G (метан), т/ч	G (углеродное топливо), т/ч	G (водородсодержащее топливо), т/ч
40	10,00	15,04	5,38
60	15,00	22,56	8,08
80	20,00	30,08	10,77
100	25,00	37,60	13,46
120	30,00	45,12	16,15
140	35,00	52,64	18,85
160	40,00	60,16	21,54
180	45,00	67,68	24,23
200	50,00	75,20	26,92
220	55,00	82,72	29,62
240	60,00	90,24	32,31
260	65,00	97,76	35,00
280	70,00	105,28	37,69
300	75,00	112,80	40,39

Учитывая вышеизложенные данные, можно заметить, что при переходе котла на водородсодержащее топливо производительность пара значительно снижается. Несмотря на это, достаточно трёх паровых котлов, работающих на водородсодержащем топливе, для обеспечения завода необходимым количеством пара в летнее время. Для получения необходимого количества пара в зимний период времени достаточно будет использовать четыре паровых котла, работающих на водородсодержащем топливе.

Следовательно, целью данной работы является разработка оптимального алгоритма управления единицами оборудования для сжигания топлива с переменной калорийностью.

Для этого следует решить следующие задачи:

1. Разработать критерий для нахождения оптимального решения.
2. Выбрать метод нахождения оптимального критерия.

4. Поиск оптимального алгоритма управления единицами оборудования

В работе рассматривается система из трёх котлов, работающих на общий паропровод. На вход котла с постоянной периодичностью поступают смеси газов с различной калорийностью. Смеси газов поступают из газовых коллекторов. Котлы объединены общим газопроводом. На входе в газопровод стоит газоанализатор, позволяющий определить тип поступающего газа. Система должна распознать газ и вынести решение об использовании алгоритма. В основу положены три алгоритма. Первый заключается в равномерном

распределении нагрузки между тремя котлами, второй заключается в равномерной работе двух котлов, а один в резерве. Последний – это «жадный» алгоритм, заключающийся в максимальной выработке ресурсов каждого котла поочередно.

4. 1. Обобщенный критерий эффективности работы системы

Для разработки критерия необходимо проанализировать систему работы объекта и учесть факторы, влияющие на ее работоспособность. За основу был взят критерий из работы [10], который включает такие показатели, как качество переходного процесса, стоимостные затраты на энергоресурсы, надежность работы оборудования, а также эффективность использования оборудования. На примере системы теплоснабжения показано переключение оборудования для оптимального соотношения цены и качества. В основу данной работы положено оптимальное использование оборудования для выработки необходимого количества пара, используя топлива различной калорийности.

Следует заметить, что пар, поступающий на ректификационную колонну, необходимо подавать непрерывно и в заданном количестве для обеспечения протекающих процессов. Недостаточное количество пара приведет к остановке оборудования. При избыточном количестве пар уходит в окружающую среду. Согласованная работа паровых котлов позволяет получить заданное количество пара, а автоматические регуляторы – наладить работу котлов на заданный режим. Следовательно, получение необходимого количества пара не повлияет на работоспособность системы в целом.

Так как в рассмотрении будет участвовать несертифицированное топливо, полученное от технологических установок, необходимо оценить экономическую целесообразность его использования. Для работы на несертифицированном топливе затраты на материальные ресурсы ничтожно малы, так как это побочный продукт. На нефтеперерабатывающем заводе среднегодового почасовое потребление пара с учетом одновременной работы оборудования и собственных нужд технологического оборудования составляет 32,2 т/ч. Для выработки средней производительности понадобится задействовать 2–3 единицы оборудования. По предварительной оценке средние затраты на электроэнергию при работе на несертифицированном топливе составляют 2,13–3,20 млн. грн. за год. При этом среднее потребление сертифицированного топлива на тонну пара составляет 111,43 м³ на тонну пара. При работе паровых котлов на сертифицированном топливе материальные затраты с учетом среднегодового потребления пара, удельной цены на топливо, а также материальные затраты на электроэнергию составили 40,72–41,78 млн. грн. в год. Данные цифры в 13–19 раз превышают затраты при работе на несертифицированном топливе. Это подтверждает экономическую целесообразность использования несертифицированного топлива, но не влияет на работу системы управления в целом.

Работа оборудования не рассчитана на использование несертифицированного топлива. При сжигании водородсодержащего газа понадобится задействовать три паровых котла на максимальной нагрузке (табл. 2). Следует также учесть, что номинальный режим работы подразумевает работу на 80 % нагрузки. Длительная

работа оборудования на нагрузках выше 80 % влияет на его надежность. Следовательно, задача критерия заключается в определении алгоритма, позволяющего использовать оборудование максимально эффективно, при этом с минимальными потерями надежности оборудования. Помимо перегрузки оборудования, на надежность также влияет частое переключение режимов и время его работы. Так как единицы измерения различны, то принято было использовать нормированные величины. Следовательно, нормированный показатель надежности оборудования R_n будет представлен следующей формулой:

$$R_n(x,t) = \sqrt{\sum \alpha_i^2(x,t)}, \tag{1}$$

где α_i – величина, учитывающая вероятность отказа i -го оборудования.

Рассчитывается данная величина по следующей формуле

$$\alpha_i = \frac{t_i \times K_{env} \times K_N + N_{sw} \times t_{sw} + K_N \times t_N}{2 \times t}, \tag{2}$$

где t_i – время работы i -той единицы оборудования на интервале времени $[t_0, t]$, сек; K_{env} , K_N – поправочные коэффициенты на параметры окружающей среды и мощности оборудования, соответственно; N_{sw} – суммарное количество переключений i -го оборудования; t_{sw} – время работы оборудования за одно переключение, сек; t_N – время работы оборудования на текущей нагрузке, сек.

Нормированная величина эффективности использования оборудования E_n определяется по следующей формуле

$$E_n(x,t) = \sqrt{1 - \eta_e}, \tag{3}$$

где η_e – энергетический коэффициент, который включает в себя преобразования первичных энергоресурсов в тепло, затраченное на выработку пара при текущем алгоритме работы. Формула энергетического коэффициента имеет вид:

$$\eta_e = \sum_{i=1}^N E_{out} / E_{in}, \tag{4}$$

где E_{out} , E_{in} – выходной и входной энергетические потоки, соответственно, МВт; N – количество энергетических потоков.

Из вышеперечисленного оптимальный критерий должен учитывать следующие факторы: эффективность использования оборудования и надежность его работы. Обобщенный критерий определяется вектором γ в пространстве координат $(R(t), E(t))$ с аргументами плана переключений технических средств x за время t :

$$J(x,t) = \sqrt{(w_R \times R_n(x,t))^2 + (w_E \times E_n(x,t))^2}, \tag{5}$$

где w_R , w_E – весовые коэффициенты, основанные на экспериментальных оценках, и равные по 0,5.

Для получения оптимального решения необходимо свести показатели критерия к минимуму(6).

$$J(x,t) \rightarrow \min_{x \in X, t \in T}. \tag{6}$$

Выполнение условия (6) позволит решить задачу оптимизации работы оборудования, а также эффективности его использования.

4. 2. Выбор метода поиска оптимального решения

Полученный критерий используется для нахождения оптимального алгоритма работы оборудования. Анализ литературных источников показал два наиболее применимых метода: генетический алгоритм и динамическое программирование. В работе [10] приведена сравнительная характеристика данных методов. Метод динамического программирования учитывает историю принятых ранее решений, а метод генетического алгоритма случайным образом выбирает пару хромосом. Предложенные алгоритмы работы оборудования и разработанный критерий включают в себя характеристики самого оборудования. Следовательно, для нахождения оптимального алгоритма работы оборудования необходимо применить метод динамического программирования.

5. Анализ результатов моделирования сжигания газов в паровом котле

Принимая во внимание, что при сжигании различного топлива паровой котел вырабатывает различного количества тонн пара, работая при постоянной нагрузке, в первую очередь необходимо проанализировать оптимальную работу котлов для каждого газа на различных нагрузках. Значения зависимости обобщенного критерия от нагрузки N были сведены в табл. 3.

Таблица 3

Сводная таблица для водородсодержащего топлива

N, %	$E_n(x,t)$	$R_n(x,t)$	$J_n(x,t)$	Алгоритм
40	4,2e-312	6,4e-314	1,00513	III
60	4,2e-312	6,4e-314	1,00513	III
80	4,2e-312	6,4e-314	1,00513	III
100	4,2e-312	6,4e-314	1,00513	III
120	4,2e-312	6,4e-314	1,00513	III
140	4,2e-312	6,2e-314	1,00513	III
160	4,4e-312	6,4e-314	1,00517	III
180	-0,00089	1,03342	1,00576	II
200	-0,00094	1,03342	1,00578	II
220	-0,00096	1,03342	1,00579	I
240	4,4e-312	6,4e-314	1,04113	I
260	4,2e-312	6,8e-314	1,03873	III
280	4,3e-312	6,2e-314	1,04342	II
300	4,1e-312	6,8e-314	1,03898	I

В табл. 3 представлены результаты расчета оптимального критерия для водородсодержащего топлива. Следует заметить, что разброс критериев незначителен. Несмотря на это, алгоритмы работы оборудования применяются различные – в зависимости от заданной нагрузки. Обобщенные критерии для углеводородного и сертифицированного топлива не представлены, так как значения критерия равносильны значениям из таблицы.

На рис. 2 графически представлено изменения критерия в динамике.

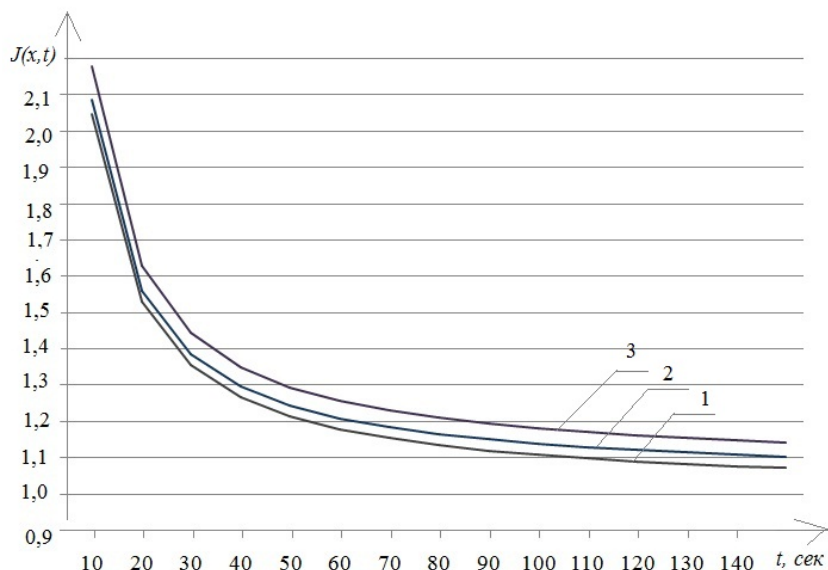


Рис. 2. График изменения оптимального критерия от нагрузки котла для 1 – 240 % нагрузки; 2 – 260 %; 3 – 280 %

Из приведенного графика видно, что показатель критерия стремится к единице уже через 150 секунд работы. На большом интервале моделирования можно увидеть, что критерий принимает значение меньше единицы. Из этого следует, что предложенный алгоритм управления обеспечивает нормальную работоспособность оборудования.

Следует заметить, что при работе котла на водородсодержащем топливе в летний период нагрузка паровых котлов максимальна. Так как на котлы с определенной периодичностью поступает газы с различной калорийностью, то работа котла на водородсодержащем топливе незначительно влияет на его работоспособность. Также следует учесть, что в зимний период необходимо задействовать больше единиц оборудования для работы на водородсодержащем топливе.

6. Выводы

На нефтеперерабатывающем заводе большое внимание уделяют сжиганию несертифицированного топлива в паровых котлах малой мощности. Наблюдается большой разброс плотностей газов (более 70 %), из чего следует переменная калорийность газа. Это влияет на

эффективное сжигание газа, так как паровые котлы не предусмотрены для сжигания топлива с переменной калорийностью. Следовательно, стояла задача эффективного сжигания несертифицированного топлива. В качестве примера были приведены две газовые смеси со следующими характеристиками: для углеродного газа плотность составляла 1,884 кг/м³ и теплотворной способностью – 18707 ккал/кг, для водородсодержащего – 0,718 кг/м³ и 11300 ккал/кг, соответственно. По предварительной оценке было показано, что данные характеристики влияют на производительность пара. Для производства 40 тонн пара в час достаточно использование одного парового котла, работающего на углеводородном топливе, на больших нагрузках.

Было предложено три алгоритма работы оборудования. Первый алгоритм включал в себя равномерное распределение нагрузки между всеми единицами оборудования. Второй алгоритм предусматривает равномерную работу двух единиц оборудования и один работает в резерве. Третий алгоритм, так называемый «жадный» алгоритм, предусматривает работу оборудования на максимально возможной нагрузке. Для выбора оптимального алгоритма работы было предложено использовать метод динамического программирования, так как данный метод позволяет принимать решение на основании принятых ранее решений, а также учитывать эффективность принятых ранее решений.

Также был приведен обобщенный критерий оценки оптимального алгоритма, который включает в себя два параметра эффективность работы оборудования и надежность его работы. Надежность оборудования предусматривает рассмотрения время работы оборудования, а также работу оборудования на заданной нагрузке. На эффективность работы влияют такие факторы как характеристики используемого топлива и коэффициент полезного действия котла. Полученные данные показали, что выбранный метод для поиска оптимального алгоритма позволяет минимизировать критерий в процессе работы. Также следует заметить, что при работе паровых котлов на несертифицированном топливе материальные затраты предприятия составляют 2,13–3,20 млн. грн. за год, что в 13–19 раз меньше, чем при использовании сертифицированного топлива.

Литература

1. Joua, C.-J. G. Enhancing the performance of a high-pressure cogeneration boiler with waste hydrogen-rich fuel [Text] / C.-J. G. Joua, C.-L. Leeb, C.-H. Tsai, H. P. Wangd, M.-L. Lina // International Journal of Hydrogen Energy. – 2008. – Vol. 33, Issue 20. – P. 5806–5810. doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.05.114
2. Максимов, М. В. Математическая модель сжигания несертифицированных видов топлива [Текст] / М. В. Максимов, В. Ф. Ложечников, Т. С. Добровольская, А. В. Бондаренко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 2, № 8 (68). – С. 44–52. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/22420/21760>
3. Ahmadi, M. H. Designing a solar powered Stirling heat engine based on multiple criteria: Maximized thermal efficiency and power [Text] / M. H. Ahmadi, H. Sayyaadi, S. Dehghani, H. Hosseinzade // Energy Conversion and Management. – 2012. – Vol. 75. – P. 282–291. doi: 10.1016/j.enconman.2013.06.025

4. Pineau, D. Performance analysis of heating systems for low energy housesn [Text] / D. Pineau, P. Rivièreb, P. Stabatb, P. Hoanga, V. Archambaulta // Energy and Buildings. – 2013. – Vol. 65. – P. 45–54. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.05.036
5. Xu, J. A novel service recovery method based on Bellman dynamic programming [Text] / J. Xu, H. Wang, G. Feng, H. Lü, S. Tian // Journal of Harbin Engineering University. – 2011. – Vol. 32, Issue 6. – P. 807–813. doi: 10.1109/ICCIA.2010.6141550
6. Sayyaadi, H. Multi-objective optimization of a vertical ground source heat pump using evolutionary algorithm [Text] / H. Sayyaadi, E. H. Amlashi, M. Amidpour // Energy Conversion and Management. – 2009. – Vol. 50, Issue 8. – P. 2035–2046. doi: 10.1016/j.enconman.2009.04.006
7. Kralj, A. K. The usage of waste hydrogen from outlet gas as a fuel in different fuel cells [Text] / A. K. Kralj // Energy. – 2010. – Vol. 35, Issue 3. – P. 1433–1438. doi: 10.1016/j.energy.2009.11.028
8. Hsua, C.-K. Reduction of energy consumption and pollution emissions for industrial furnace using hydrogen-rich tail gas [Text] / C.-K. Hsua, C.-L. Leeb, C.-H. Wangc, C.-J. G. Jou // International Journal of Hydrogen Energy. – 2014. – Vol. 39, Issue 18. – P. 9675–9680. doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.03.195
9. Профос, П. Регулирование паросиловых установок [Текст] / П. Профос. – М.: Энергия, 1967. – 368 с.
10. Давыдов, В. О. Сравнительный анализ метода генетического алгоритма и динамического программирования на примере решения задачи управления системой с переменной структурой [Текст] / В. О. Давыдов, О. Б. Максимова, Т. С. Добровольская // Журнал «Холодильная техника и технология». – 2013. – 5(145). – С. 77–81.

У статті виконані дослідження температурного поля силових напівпровідникових приладів при дії струмового імпульсу довільної форми на основі моделі, що адекватно відтворює їх конструкцію; розроблена інженерна методика розрахунку, що дозволяє правильно розраховувати тепловий режим роботи напівпровідникових приладів у складі напівпровідникових апаратів і раціонально вибирати їх тип; наведені приклади розрахунку

Ключові слова: перевищення температури, струмове навантаження, теплофізична модель, напівпровідниковий ключ, напівпровідниковий апарат

В статье выполнены исследования температурного поля силовых полупроводниковых приборов при воздействии токового импульса произвольной формы, на основе модели, адекватно отражающей их конструкцию; разработана инженерная методика расчёта, позволяющая правильно рассчитывать тепловой режим работы полупроводниковых приборов в составе полупроводниковых аппаратов и рационально выбирать их тип; приведены примеры расчёта

Ключевые слова: превышение температуры, токовая нагрузка, теплофизическая модель, полупроводниковый ключ, полупроводниковый аппарат

1. Вступ

Дане дослідження належить до електротехніки, зокрема до галузі комутаційних напівпровідникових апаратів низької напруги [1].

УДК 621.316

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.27983

РОЗРАХУНОК ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ В УМОВАХ РОБОТИ У СКЛАДІ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ АПАРАТІВ

А. Г. Сосков

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри*
ansoskov@gmail.com

М. Л. Глєбова

Кандидат технічних наук, доцент*
toe@kname.edu.ua

Н. О. Сабалаєва

Кандидат технічних наук, доцент*
natalysub@mail.ru

Я. Б. Форкун

Кандидат технічних наук, доцент*
jana_forkun@mail.ru

*Кафедра теоретичної та загальної електротехніки
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова
вул. Революції, 12, м. Харків, Україна, 61002

В комутаційних напівпровідникових апаратах (НА) як гібридних [2], так і безконтактних [3] силові напівпровідникові прилади (СНП) входять до складу напівпровідникових ключів (НК), що забезпечують бездугову комутацію потоків електричної потужності,