

УДК 621.311

Г.И. Лагутин

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

## АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ КОМПЛЕКСАМИ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

В статье рассматриваются пути совершенствования процесса определения расчетных нагрузок комплексов вооружения и военной техники с применением математического аппарата теории массового обслуживания. Для определения требуемой мощности источников электрической энергии предлагается использовать систему дифференциальных уравнений Колмогорова для вероятностей состояний.

**Ключевые слова:** автономные источники электроэнергии, расчетные нагрузки, марковский процесс случайных событий с дискретными состояниями и непрерывным временем, предельные вероятности состояний.

### Введение

**Постановка проблемы.** При модернизации и закупке новых комплексов вооружения и военной техники для Вооруженных Сил Украины одновременно должна быть решена и задача переоснащения и замены источников электроэнергии. В рамках решения этой задачи необходимо определиться с тем, какие именно технические, эксплуатационные, экономические и другие характеристики должны иметь такие источники электрической энергии для поддержания на заданном уровне боевого потенциала.

Одной из технических характеристик автономных источников электроэнергии для образцов вооружения является их мощность. Правильное определение мощности автономных источников электроэнергии позволяет оптимизировать состав системы электроснабжения комплекса вооружения и военной техники в целом и ее отдельных элементов. Занижение значений мощности электростанций может привести к перегреву обмоток синхронных генераторов, токоведущих частей и их выходу из строя, а завышение значений мощности электростанций приводит к нерациональному расходу средств, недогруженности элементов электростанций, снижению коэффициента полезного действия и т. п.

При выборе мощности автономных электростанций значительную часть информации получают из анализа режимов потребления электрической энергии комплексами вооружения и военной техники [1].

**Анализ последних исследований и публикаций.** На практике при подготовке исходных данных для выбора мощности источников электроэнергии используются два подхода к определению нагрузок электрооборудования [2].

Первый подход основан на применении графиков электрических нагрузок [3], представляющих собой зависимость величины потребленной мощности в функции времени. Для некоторых групп потребителей, таких как промышленные, коммуналь-

ные предприятия, электроосвещение жилых домов и общественных зданий, бытовые электроприемники малой мощности и т.п., построены типовые графики нагрузок за летние и зимние сутки. Такой подход позволяет определить достаточно большое количество показателей, характеризующих режим работы электроустановок, такие как количество электроэнергии  $W$ , выработанной за определенный период времени, среднюю мощность  $P_{cp}$ , время использования максимальной нагрузки  $T_{max}$ , коэффициент нагрузки  $k_n$ , коэффициент использования  $k_{и}$  и др. Однако, использование этого подхода ограничено отсутствием типовых графиков нагрузок для комплексов вооружения и военной техники.

При втором подходе расчеты нагрузок выполняются производственно-статистическими методами, наибольшее распространение из которых нашли [4, 5]: метод коэффициента спроса; метод двучленной формулы; метод удельных показателей; метод Г.М. Каялова.

Эти методы являются менее точными и позволяют получить лишь ориентировочные данные, которые необходимы при определении мощности автономных источников электрической энергии систем электроснабжения общевойскового и специального назначения.

Кроме того, применение указанных методов также требует наличия информации о таких показателях, как коэффициент спроса  $k_c$ , коэффициент использования  $k_{и}$ , коэффициент максимума нагрузки  $k_m$ , и др., которые обычно находятся с помощью упорядоченных диаграмм или специальных таблиц на основе графика электрических нагрузок и для комплексов вооружения и военной техники просто не существуют. Некоторые методы, такие как метод удельных показателей, вообще затруднительно использовать для указанной цели, т. к. указанный метод основан на понятии удельной нагрузки  $P_y$  на единицу производственной площади, что не свойственно для большинства военных потребителей электроэнергии.

**Целью статьи** является совершенствование процесса определения расчетных нагрузок комплексов вооружения и военной техники с использованием математического аппарата теории массового обслуживания.

### Изложение основного материала

В общем случае, процесс функционирования комплексов вооружения носит случайный характер, что значительно усложняет процесс анализа режимов потребления электрической энергии такими комплексами. Однако, если неопределенные факторы представляют собой случайные величины, вероятностные характеристики которых известны или потенциально могут быть получены, задача определения расчетных мощностей комплексов вооружения может быть сведена к стохастической задаче исследования операций. Так, нам в точности неизвестно, какие именно режимы работы комплекса вооружения будут использованы в цикле его функционирования, когда именно будет вводиться тот или иной режим и сколько времени каждый из этих режимов будет применяться. Но, с другой стороны, характеристики этих случайных величин могут быть получены статистическим путем.

Можно показать, что в общем случае процесс функционирования комплексов вооружения и военной техники можно рассматривать как простейший марковский процесс случайных событий с дискретными состояниями и непрерывным временем [6]. Рассмотрим комплекс вооружения  $S$ , который в процессе своего функционирования в случайный момент времени может перейти в одно из четырех состояний, характеризующихся определенным значением потребляемой мощности, после чего будет находиться в этом состоянии заранее неизвестное, случайное время. Возможные состояния комплекса можно перечислить:

$S_0$  – отключенное состояние;

$S_1$  – развернутое состояние;

$S_2$  – дежурное состояние;

$S_3$  – состояние боевой работы.

Переходы комплекса  $S$  из состояния  $S_i$  в состояние  $S_j$  происходят практически мгновенно, в момент поступления соответствующей команды от органа управления. Будем считать, что за цикл функционирования указанные потоки событий характеризуются интенсивностями  $\lambda_i$  ( $i = 0, 1, 2, 3$ ), где  $\lambda_0$  – среднее количество команд на перевод комплекса вооружения в отключенное состояние за единицу времени,  $\lambda_1$  – среднее количество команд на перевод комплекса вооружения в развернутое состояние за единицу времени,  $\lambda_2$  – среднее количество команд на перевод комплекса вооружения в дежурное состояние за единицу времени,  $\lambda_3$  – среднее количество команд на перевод комплекса вооружения в состояние боевой работы за единицу времени. Данные состояния жестко регламентируют количество включенных элементов комплекса вооружения, что позволяет определить электрическую мощность  $P_i$  ( $i = 0, 1, 2, 3$ ), потребляемую приемниками электрической энергии комплекса в каждом из этих состояний.

Очевидно, что каждый из потоков событий, определяющих переходы комплекса в различные состояния, обладает свойствами стационарности, ординарности и отсутствия последствия. В самом деле, в каждый момент времени может поступить только одна команда на перевод комплекса в то или иное состояние (ординарность), интенсивность потоков событий  $\lambda_i$  в процессе функционирования комплекса обычно не меняется (стационарность), а события, образующие поток, появляются в те или иные моменты времени независимо друг от друга (отсутствие последствия). Тогда согласно [6] процесс, протекающий в данной системе, будет марковским.

Граф состояний для рассмотренного примера приведен на рис. 1.

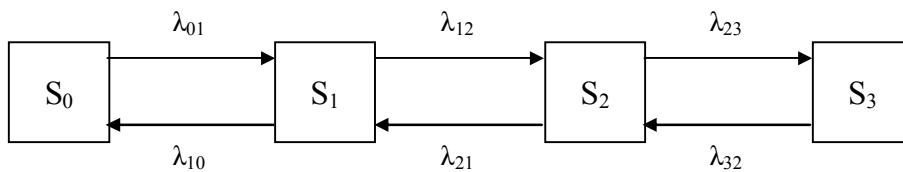


Рис. 1. Граф системы состояний случайного процесса

Вероятностью  $i$ -го состояния будем называть вероятность  $p_i(t)$  того, что в момент  $t$  система будет находиться в состоянии  $S_i$ . Очевидно, что для любого момента  $t$  сумма вероятностей всех состояний равна единице:

$$\sum_{i=1}^3 p_i(t) = p_0(t) + p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) = 1.$$

Рассмотрим систему в момент  $t$  и, задав малый промежуток  $\Delta t$ , найдем вероятность  $p_0(t+\Delta t)$  того,

что система в момент  $t+\Delta t$  будет находиться в состоянии  $S_0$ . Система может оказаться в этом состоянии различными способами.

1. Система в момент  $t$  с вероятностью  $p_0(t)$  находилась в состоянии  $S_0$ , и за время  $\Delta t$  не вышла из него.

Очевидно, что система при своем функционировании под действием простейшего потока событий с интенсивностью  $\lambda_{01}$  может перейти из состояния  $S_0$  в состояние  $S_1$  с вероятностью, приближенно

равной  $\lambda_{01} \cdot \Delta t$ . А вероятность того, что система не выйдет из состояния  $S_0$ , будет равна  $[1 - \lambda_{01} \cdot \Delta t]$ . Таким образом, вероятность того, что система находилась в состоянии  $S_0$  и не вышла из него за время  $\Delta t$ , равна по теореме умножения вероятностей:

$$p_0(t) \cdot [1 - \lambda_{01} \cdot \Delta t].$$

2. Система в момент  $t$  с вероятностью  $p_1(t)$  находилась в состоянии  $S_1$ , но за время  $\Delta t$  перешла в состояние  $S_0$ .

Аналогично рассмотренному выше, система под действием потока с интенсивностью  $\lambda_{10}$  может перейти в состояние  $S_0$  с вероятностью, приближенно равной  $\lambda_{10} \cdot \Delta t$ . Таким образом, вероятность того, что система будет находиться в состоянии  $S_0$  по этому варианту, равна  $p_1(t) \cdot \lambda_{10} \cdot \Delta t$ . Применяя теорему сложения вероятностей, получим

$$p_0(t+\Delta t) = p_1(t) \cdot \lambda_{10} \cdot \Delta t + p_0(t) \cdot [1 - \lambda_{01} \cdot \Delta t],$$

откуда

$$\frac{p_0(t+\Delta t) - p_0(t)}{\Delta t} = \lambda_{10} \cdot p_1(t) - \lambda_{01} \cdot p_0(t).$$

Переходя к пределу при  $\Delta t \rightarrow 0$  (при этом приближенные равенства перейдут в точные), получим в левой части уравнения производную  $p'_0(t)$  (обозначим ее  $p'_0$ ):

$$p'_0 = \lambda_{10} \cdot p_1 - \lambda_{01} \cdot p_0.$$

Таким образом, получено дифференциальное уравнение первого порядка, т.е. уравнение, содержащее как саму неизвестную функцию, так и ее производную первого порядка.

Рассуждая аналогично для других состояний системы  $S$ , можно получить систему дифференциальных уравнений Колмогорова для вероятностей состояний:

$$\begin{cases} p'_0 = \lambda_{10} \cdot p_1 - \lambda_{01} \cdot p_0; \\ p'_1 = \lambda_{01} \cdot p_0 + \lambda_{21} \cdot p_2 - (\lambda_{10} + \lambda_{12}) \cdot p_1; \\ p'_2 = \lambda_{12} \cdot p_1 + \lambda_{32} \cdot p_3 - (\lambda_{21} + \lambda_{23}) \cdot p_2; \\ p'_3 = \lambda_{23} \cdot p_2 - \lambda_{32} \cdot p_3. \end{cases}$$

В качестве начальных условий для решения полученной системы дифференциальных уравнений могут быть приняты вероятности состояний комплекса вооружения в начальный момент  $t = 0$ . Естественно предположить, что в начальный момент система находилась в состоянии  $S_0$ , т.е. при начальных условиях:

$$p_0(0) = 1, \quad p_1(0) = p_2(0) = p_3(0) = 0.$$

Уравнения Колмогорова дают возможность найти все вероятности состояний как функции времени. Особый интерес представляют вероятности системы  $p_i(t)$  в предельном стационарном режиме, т.е. при  $\Delta t \rightarrow 0$ , которые называются предельными вероятностями состояний.

В теории случайных процессов доказывается, что если число состояний системы конечно и из каждого из них можно (за конечное число шагов) перейти в любое другое состояние, то предельные вероятности существуют.

Предельную вероятность состояния  $S_i$  можно истолковать как среднее относительное время пребывания системы в этом состоянии. Например, если предельные вероятности, полученные в результате решения системы дифференциальных уравнений, равны  $p_0 = 0,1$ ,  $p_1 = 0,4$ ,  $p_2 = 0,3$ ,  $p_3 = 0,2$  то это означает, что в предельном, стационарном режиме комплекс вооружения в среднем одну десятую времени проводит в состоянии  $S_0$ , потребляя электрическую мощность  $P_0$ , четыре десятых времени проводит в состоянии  $S_1$ , потребляя электрическую мощность  $P_1$ , три десятых времени проводит в состоянии  $S_2$ , потребляя электрическую мощность  $P_2$  и две десятых времени проводит в состоянии  $S_3$ , потребляя электрическую мощность  $P_3$ .

На основе полученных решений могут быть построены суточные и годовые по длительности графики электрических нагрузок рассматриваемого комплекса вооружения, по которым известными методами могут быть получены все необходимые данные для определения требуемой мощности источников электрической энергии.

## Выводы

1. Существующие методы определения расчетных нагрузок потребителей электрической энергии не в полной мере учитывают особенности функционирования комплексов вооружения и военной техники и не могут быть использованы для выбора мощностей автономных источников электроэнергии для образцов вооружения.

2. Задача определения расчетных мощностей комплексов вооружения может быть сведена к стохастической задаче исследования операций.

3. Используя систему дифференциальных уравнений Колмогорова для вероятностей состояний, возможно построить график электрических нагрузок рассматриваемого комплекса вооружения, из которого известными методами могут быть получены все необходимые данные для определения требуемой мощности источников электрической энергии.

## Список литературы

1. *Електропостачання і електрообладнання військових об'єктів. Ч. 2* / В.Б. Толубко, Б.Т. Кононов, Б.Ф. Самойленко, М.І. Григоров. – МО України, 1998. – 374 с.
2. *ДБН В 2.5-23-2003. Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення.* – К.: Держбуд України, 2004. – 132 с.
3. *Методичні рекомендації по проектуванню систем гарантованого електропостачання* / В.Г. Кузнецов, С.Д. Федоров, С.В. Облакевич, Е.П. Островський. – К.: ТОВ «Видавництво Аратта», 2005. – 76 с.

4. Скрипко В.К. Выбор электрооборудования и релейной защиты внутриводского электроснабжения промышленных предприятий: уч. пособ. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2000. – 80 с.

5. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4 – 35 кВ / под ред. И.Т. Горюнова и др. – М.: Папирус Про, 1999. – 608 с.

6. Венцель Е.С. Исследование операций: задачи,

примеры, методология. 2-е изд., стер. / Е.С. Венцель. – М.: Наука, 1988. – 208 с.

Поступила в редколлегию 4.08.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Б.Т. Кононов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## АНАЛІЗ РЕЖИМІВ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ КОМПЛЕКСАМИ ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ

Г.І. Лагютін

У статті розглядаються шляхи вдосконалення процесу визначення розрахункових навантажень комплексів озброєння та військової техніки із застосуванням математичного апарата теорії масового обслуговування. Для визначення необхідної потужності джерел електричної енергії пропонується використовувати систему диференціальних рівнянь Колмогорова для ймовірностей станів.

**Ключові слова:** автономні джерела електроенергії, розрахункові навантаження, марковський процес випадкових подій з дискретними станами й безперервним часом, граничні ймовірності станів.

## THE WEAPON SYSTEM AND MILITARY EQUIPMENT ELECTRIC POWER CONSUMPTION MODES ANALYSIS

G.I. Lagytin

This article presents the improvement ways of the definition the designed load points for the weapon system and military equipment using the mathematical tool mass service theory. For the required power electric power sources determination the Kolmogorov differential equation system for state probability is provided.

**Keywords:** independent power source, designed load point, Markovian process with discrete states and continuous time, limit probability states.