

---

---

УДК 621.332

## ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ В СЛОЖНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ

© 2024 г. Б. В. Папков<sup>1</sup>, П. В. Илюшин<sup>2,\*</sup>, А. Л. Куликов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Нижегородский государственный инженерно-экономический университет»,  
Княгинино, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт энергетических исследований Российской академии наук,  
Москва, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Нижегородский государственный  
технический университет им. Р.Е. Алексеева»,  
Нижний Новгород, Россия  
\*e-mail: ilyushin.pv@mail.ru

Поступила в редакцию 05.09.2024 г.

После доработки 19.09.2024 г.

Принята к публикации 20.09.2024 г.

Решение задач оптимизации режимов и управления энергопотреблением в сложных производственных системах тесно связано с наличием достаточной и достоверной информации об особенностях технологического процесса. Рассмотрены особенности нестационарных режимов выпуска продукции и возможности по управлению электропотреблением в этих условиях. Результаты анализа режимов электропотребления получены на основе учета ряда случайных факторов, определяемых как внутренними, так и внешними обстоятельствами при условии обязательного выполнения плана (задания) по выпуску продукции. Обосновано применение теории выбросов случайных процессов для повышения достоверности исходной информации. Доказана необходимость дальнейшего исследования особенностей технологических процессов в сложных производственных системах на основе вероятностной структуры и случайных функций. Это обусловлено тем, что характеристики выбросов обладают физической наглядностью, достаточно просто измеряются, и во многих задачах позволяют одновременно с измерениями выполнять переход от аналоговой к цифровой форме представления информации.

*Ключевые слова:* сложная производственная система, технологический процесс, оптимизация режимов, управление электропотреблением, теория выбросов случайных процессов, случайная функция

DOI: 10.31857/S0002331024040039

## ВВЕДЕНИЕ

В процессе развития цифровой электроэнергетики изменяются принципы взаимодействия между производителями и потребителями электроэнергии за счет внедрения современных измерительных, коммуникационных, информационно-вычислительных систем, а также систем сбора, передачи и обработки данных [1–3]. На энергообъектах все чаще применяются киберфизические устройства, технологии Интернета вещей и искусственного интеллекта, средства роботизации, дополненная и виртуальная реальности [4, 5].

Интеллектуализация электроэнергетики требует больших массивов данных, обработка которых создает качественно новую информационную основу для создания автоматизированных систем управления электропотреблением в сложных производственных системах. Изменения, происходящие в электроэнергетике, обуславливают необходимость пересмотра существующих методов и моделей планирования, прогнозирования, управления электропотреблением, надежностью и экономикой потребителей, что непосредственно влияет на технологический процесс и выпуск продукции [6, 7].

Техногенные воздействия на объекты электроэнергетики, включая кибератаки, показали, что структура электропотребления и его величина могут существенно изменяться как в большую, так и меньшую сторону [8, 9]. Флуктуации электропотребления возможны в случаях, когда выполнение договорных обязательств по выпуску продукции являются приоритетными. Используемые ранее для управления электропотреблением административные и рыночные механизмы в современных условиях малоэффективны, а новые технологии управления не в полной мере отработаны. Следовательно, имеются все основания для уточнения постановки задачи и разработки современных методов планирования, прогнозирования, оптимизации режимов и управления энергопотреблением в сложных производственных системах. В условиях перманентного изменения режимов, а также структуры и параметров электроэнергетических систем (ЭЭС) и систем электроснабжения (СЭС) необходимо создание новых математических моделей и разработка алгоритмов для принятия эффективных решений по управлению электропотреблением [10].

Целью исследования является анализ режимов электропотребления в сложных производственных системах и обоснование необходимости применения теории выбросов случайных процессов с целью повышения достоверности исходной информации, необходимой при создании автоматизированных систем управления электропотреблением.

## АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ПРИ ВЫПУСКЕ ПРОДУКЦИИ

Фактические режимы работы современных ЭЭС и СЭС, в которые интегрированы традиционные электростанции (тепловые, атомные, гидроэлектрические), электростанции на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), объекты распределенной энергетики (РЭ) и системы накопления электроэнергии (СНЭЭ) существенно отличаются от плановых [11, 12]. В этих условиях сложно с высокой точностью прогнозировать выработку электроэнергии для обеспечения электроснабжения сложных производственных систем в требуемых объемах и с нормативным качеством электроэнергии [13, 14]. Величина электропотребления зависит от особенностей технологического процесса и плана (задания) по выпуску продукции. Кроме того, реальные

технологические процессы подвержены воздействиям случайных факторов и поэтому имеют вероятностную величину электропотребления на любой из стадий.

Используемые технологии управления электропотреблением имеют ограниченные возможности и поэтому не подходят для современных автоматизированных систем управления [15]. Это обусловлено быстрыми изменениями схемно-режимных ситуаций, ограничениями по пропускной способности электротехнического оборудования в СЭС, а также сложностью оценки технико-экономических последствий от изменения режима электропотребления. Так как управление электропотреблением оказывает значительное влияние на параметры технологического процесса и объемы выпуска продукции, то анализ моделей управления электропотреблением следует начинать с особенностей объекта управления. В [16] приведены схемы систем управления электропотреблением, обеспечивающие взаимодействие ЭЭС и СЭС, в том числе при возникновении дефицитов мощности [17]. Они позволяют анализировать воздействия ЭЭС и СЭС, а также возможности перехода технологического процесса в новое состояние с новым режимом электропотребления. Решение этих задач возможно только при глубоком понимании особенностей технологического процесса и СЭС, а также применении математического аппарата теории вероятностей, математической статистики и теории случайных функций.

Обеспечение контроля за соблюдением технологических регламентов и выполнением плана (задания) по выпуску продукции на всех участках сложной производственной системы необходимо для решения задачи управления электропотреблением, оценке надежности ЭЭС и СЭС, а также минимизации технико-экономических потерь в разных режимах работы СЭС и на разных стадиях технологического процесса. Для решения задачи управления электропотреблением необходимо обеспечить получение достоверной информации о состоянии и режимах как СЭС, так и сложной производственной системы [18–20].

В зависимости от целевого назначения сложной производственной системы, ее производительности, условий эксплуатации, а также влияния внешних и внутренних факторов задачи контроля состояния будут отличаться. Следовательно, контроль состояния должен быть организован таким образом, чтобы не пропустить возможные изменения в работе как сложной производственной системы, так и ее СЭС.

Решение этой задачи определяется:

- количеством, типами и параметрами управляемых элементов;
- последовательностью, длительностью и периодичностью контроля состояния сложной производственной системы и СЭС;
- оценкой точности контроля состояния сложной производственной системы и СЭС;
- оценкой достоверности прогнозирования состояния сложной производственной системы и СЭС.

Прогнозирование состояния сложной производственной системы, ЭЭС и СЭС при принятии решений об управлении параметрами технологического процесса и режимами электропотребления осуществляется на основе трендов изменения режимов и параметров технологического процесса. При этом важно оценивать вероятность выхода параметров технологического процесса за допустимые пределы, так как это влияет на возможность выполнения плана (задания) по выпуску продукции, вероятность выбросов случайных процессов и значительного изменения режима электропотребления.

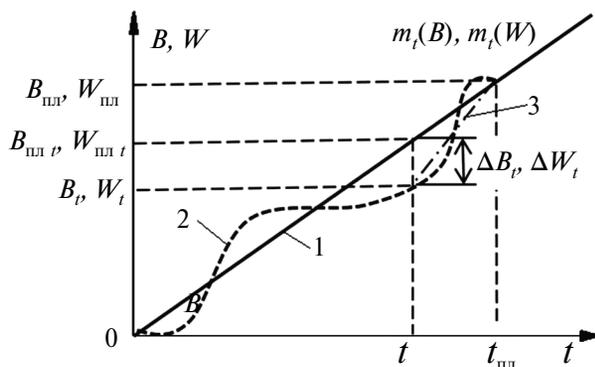
## АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ В СЛОЖНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ

Возможность выполнения плана (задания) по выпуску продукции связано с рядом случайных факторов, определяемых как внутренними, так и внешними обстоятельствами. Одним из них – величина потребляемой мощности ( $P$ , кВт) в данный момент времени. Вторым – электропотребление ( $W$ , кВт·ч) за период  $t_{\text{пл}}$ , необходимый для своевременного выполнения плана (задания) по выпуску продукции при соблюдении режима электроснабжения.

В [21] показано, что зависимость выпуска продукции  $B$  от электропотребления  $W$  на обследованных сложных производственных системах является не функциональной  $B = f(W)$ , а вероятностной, которая определяется на основе коэффициентов корреляции, изменяющихся в диапазоне  $r_{B,W} = 0.43 \div 0.89$ . В большей степени это характерно для предприятий, выпускающих мелкосерийную продукцию, где одновременно осуществляется выпуск изделий большой номенклатуры, находящийся на разных стадиях технологического процесса. В сложных производственных системах крупных промышленных предприятий влияние перечисленных факторов также наблюдается.

Рассмотрим процесс выпуска продукции в соответствии с планом (заданием) на основе вероятностных методов анализа. Очевидно, что отклонения технологических параметров и электропотребления даже по двум договорам на производство равных объемов одинаковой продукции могут значительно отличаться. Для двух одинаковых заказов, имеющих одинаковые отклонения от плановых значений  $\Delta B$  и  $\Delta W$  для определенного момента времени  $t$ , они могут отличаться. Если в одном случае технологический процесс может находиться в начальной стадии, то в другом случае – в завершающей стадии.

Пример графика выполнения плана (задания) по выпуску продукции  $B$  и электропотреблению  $W$  одной из сложных производственных систем представлен на рис. 1.



**Рис. 1.** График выполнения плана (задания) по выпуску продукции  $B$  и электропотреблению  $W$  сложной производственной системы: 1 – плановый; 2 – возможный вариант выпуска продукции; 3 – альтернативный вариант выпуска продукции на одной из стадий.

В общем случае это нестационарный случайный процесс [22], в предположении, что планируемые величины  $B_{пл}(t)$ ,  $W_{пл}(t)$  на момент  $t$  представляются математическими ожиданиями по объему выпуска продукции и электропотреблению:

$$m_B(t) = B_{пл} \neq \text{const}; m_W(t) = W_{пл} \neq \text{const}. \quad (1)$$

Ожидаемое состояние производственной системы характеризуется вероятностью выполнения объема работ  $p(B_t)$  и, соответственно, вероятностью электропотребления  $p(W_t)$  в момент времени  $t$ . Система контроля фиксирует в момент  $t$  фактические значения  $B_t$  и  $W_t$ . Вероятность выпуска полного объема продукции в соответствии с договором определяется вероятностью выпуска недостающего объема продукции за время  $t_{пл} - t$  [22].

Однако процесс выпуска продукции в соответствии с планом (заданием) может быть сорван или изменен по разным причинам – административным, технологическим, электрическим. Это может быть обусловлено несвоевременным поступлением сырья и комплектующих, отказами технологического и/или электротехнического оборудования. Отставание от графика выпуска продукции  $\Delta B_t$  и недополучение необходимого количества электроэнергии  $\Delta W_t$  в момент  $t$  (рис. 1) достаточно велико и не может быть скомпенсировано имеющимися резервами за период времени  $t_{пл} \div t$ .

Для упрощения модели предположим, что в момент времени  $t$  перечисленные причины являются взаимно независимыми событиями. Тогда вероятность выполнения плана (задания) по выпуску продукции  $p_t(B_{пл})$  можно определить как произведение вероятностей [23]:

$$p_t(B_{пл}) = p(\Delta B_t) = p_t(A) \cdot p_0(t, t_{пл}) \cdot p_A(t, t_{пл}), \quad (2)$$

где  $p(\Delta B_t)$  – вероятность компенсации отклонения  $\Delta B_t$  за период времени  $t_{пл} \div t$ , при условии выполнения всех технологических регламентов;  $p_t(A)$  – вероятность отсутствия отказов технологического оборудования к моменту времени  $t$ , приводящих к невыполнению плана (задания);  $p_0(t, t_{пл})$  – вероятность выполнения плана по поставке сырья и других требуемых ресурсов;  $p_A(t, t_{пл})$  – безотказная работа оборудования за период времени  $t_{пл} \div t$ .

Аналогичным образом следует определять вероятность наличия необходимого количества электроэнергии для выполнения плана (задания) по выпуску продукции  $p_t(B_{пл})$ , которая зависит от особенностей СЭС промышленного предприятия, а именно, возможности по компенсации  $\Delta W_t$  за период времени  $t_{пл} \div t$ , и наличия избытка электроэнергии в ЭЭС:

$$p_t(B_{пл}) = p(\Delta W_t) = p_t(\Theta) \cdot p_K(t, t_{пл}) \cdot p_{ЭЭС}(t, t_{пл}), \quad (3)$$

где  $p(\Delta W_t)$  – вероятность компенсации отклонения  $\Delta W_t$  за период времени  $t_{пл} \div t$  при наличии возможности компенсации  $\Delta W_t$  со стороны СЭС промышленного предприятия и ЭЭС;  $p_t(\Theta)$  – вероятность отсутствия отказов электротехнического оборудования в СЭС к моменту  $t$ , приводящих к невыполнению плана (задания);  $p_K(t, t_{пл})$  – вероятность наличия избытка электроэнергии в ЭЭС;  $p_{ЭЭС}(t, t_{пл})$  – вероятность безотказной работы электротехнического оборудования ЭЭС за период времени  $t_{пл} \div t$ .

Анализ рис. 1 показывает, что выпуск продукции, в соответствии с технологическим процессом, осуществляется с плановой (расчетной) скоростью  $V_{пл}$ , которая может быть определена по формуле (4):

$$V_{\text{пл}} = B_{\text{пл}}/t. \quad (4)$$

Если сложная производственная система работает без отклонений от плановой (расчетной) скорости  $V_{\text{пл}}$ , то математическое ожидание по выпуску заданного объема продукции к моменту времени  $t$  можно определить по формуле (5):

$$m_B(t) = V_{\text{пл}}t. \quad (5)$$

Если сложная производственная система работает с недогрузкой (перегрузкой) при соответствующем недостатке (избытке) производства электроэнергии на собственном объекте РЭ, то скорость выпуска продукции будет определяться по формуле (6):

$$m_B(t) = \bar{V}_t t, \quad (6)$$

где  $\bar{V}_t$  – средняя скорость выпуска продукции на интервале времени  $0 \div t$ .

В общем случае скорость выпуска продукции является функцией  $V(t)$ , тогда:

$$m_B(t) = B_{\text{пл}}(t) = \int_0^t V(t)dt, \quad (7)$$

что в реальных условиях соответствует плану (заданию) по выпуску продукции при плановой величине электропотребления на момент времени  $t$ .

Так как в технологическом процессе имеют место случайные отклонения по выпуску продукции  $\Delta B_t = B_{\text{пл}} - B_t$  и электропотреблению  $\Delta W_t = W_{\text{пл}} - W_t$  (рис. 1), то необходим переход на новую скорость выпуска продукции (штрих-пунктирная линия 3 на рис. 1), которую можно определить по формуле (8):

$$V_t = V_{\text{пл}} + \Delta V = V_{\text{пл}} + \Delta B_t / (t_{\text{пл}} \div t). \quad (8)$$

Тогда вероятность компенсации отклонения  $p(\Delta B_t)$  за период времени  $t_{\text{пл}} \div t$  определяется вероятностью перехода технологического процесса к работе со скоростью  $V_t$ , которая является случайной величиной [22]. Если закон распределения  $p(V)$  и его параметры известны, то вероятность компенсации отклонения выпуска продукции  $p(\Delta B_t)$  и, соответственно, электропотребления из ЭЭС  $p(\Delta W_t)$  можно определить как вероятность того, что реальная скорость выполнения плана (задания) по выпуску продукции  $B_{\text{пл}}$  при электропотреблении  $W_{\text{пл}}$  за оставшееся время  $t_{\text{пл}} \div t$  примет значение  $V \geq V_t$ :

$$p(\Delta B \geq \Delta B_t) = p(\Delta W \geq \Delta W_t) = p(V \geq V_t) = \int_{V_t}^{V_{\text{max}}} p(V)dV, \quad (9)$$

где  $V_{\text{max}}$  – максимальная скорость выпуска продукции.

Анализируя множители в формуле (3), отметим, что отказ электротехнического оборудования в СЭС или ЭЭС на начальной стадии выпуска продукции и в его конце существенно отличаются своими технико-экономическими последствиями. При равных временах ремонта (замены) электротехнического оборудования в первом случае вероятность выполнения плана (задания) существенно выше. Поэтому следует учитывать, что вероятности зависят от времени возникновения отказа.

Определить минимальное время, за которое можно выполнить план (задание) по выпуску продукции при работе с максимальной скоростью  $V_{\text{max}}$ , можно по формуле (10):

$$t_{\text{min}} = B_{\text{пл}}/V_{\text{max}}. \quad (10)$$

Если в начале производственного процесса произошел отказ элемента в СЭС на время  $t_0$  (задержка на время проведения ремонта элемента), то при работе с  $V_{\max}$  план (задание) может быть выполнен. При этом  $t_0$  можно определить по формуле (11):

$$t_0 = t_{\text{пл}} - t_{\text{мин}} = t_{\text{пл}} - B_{\text{пл}}/V_{\text{max}}. \quad (11)$$

Предположим, что в момент времени  $t$  при известных  $B_t$  и  $W_t$ , (рис. 1) возникла задержка в выпуске продукции на время  $t_1 - t$  при условии, что дальше скорость выпуска продукции была увеличена до  $V_{\max}$ . В этом случае произойдет увеличение потребляемой мощности  $P_{\max}$ , а конечная величина электропотребления  $W_{\text{пл}}$  останется неизменной (рис. 2).

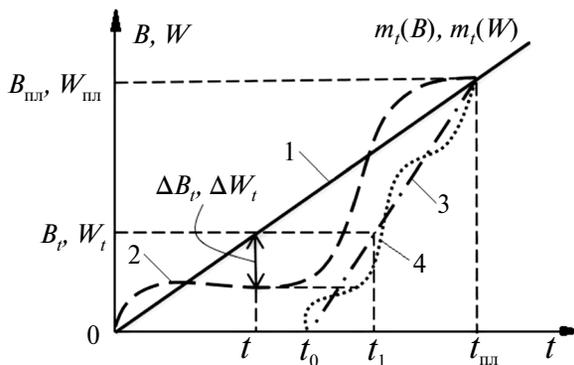
Из рис. 2 видно, что если в момент времени  $t$  произошел отказ элемента в СЭС или технологической линии, то при его восстановлении за время  $t_{\text{в}} = t_1 - t$  появляется возможность выполнения плана (задания) по выпуску продукции. Однако, чем ближе момент времени  $t$  к концу установленного срока выполнения задания  $t_{\text{пл}}$ , тем меньший интервал времени остается для восстановления отказавшего элемента (рис. 2). Поэтому  $t_{\text{в}}$  является допустимым временем проведения работ по восстановлению элемента:

$$t_{\text{в доп}} = t_{\text{пл}} - t_1 - t. \quad (12)$$

Оценка последствий ликвидации отклонений в выпуске продукции от плана (задания) должна производиться на основе технико-экономического ущерба (штрафа, компенсации потерь)  $Y = f(\pm\Delta B_t, \pm\Delta W_t)$ , учитывающей как факторы, приведенные в [18–20], так и материальные, моральные и др. [24].

Алгоритм контроля текущего состояния технологического процесса и электропотребления представляет собой линейную последовательность операций, блок-схема которого приведена на рис. 3.

Реализация алгоритма (рис. 3) позволяет обеспечить контроль текущих отклонений  $\pm\Delta B_t, \pm\Delta W_t$ , с соответствующей технико-экономической оценкой ущерба от возможных отклонений на любом уровне сложной производственной системы:



**Рис. 2.** График выполнения плана (задания) по выпуску продукции  $B$  и электропотреблению  $W$  при задержке на время проведения ремонта элемента: 1 — плановый; 2 — возможный вариант выпуска продукции; 3 — вариант выпуска продукции со скоростью  $V_{\max}$ ; 4 — альтернативным вариантом выпуска продукции со скоростью  $V_{\max}$ .

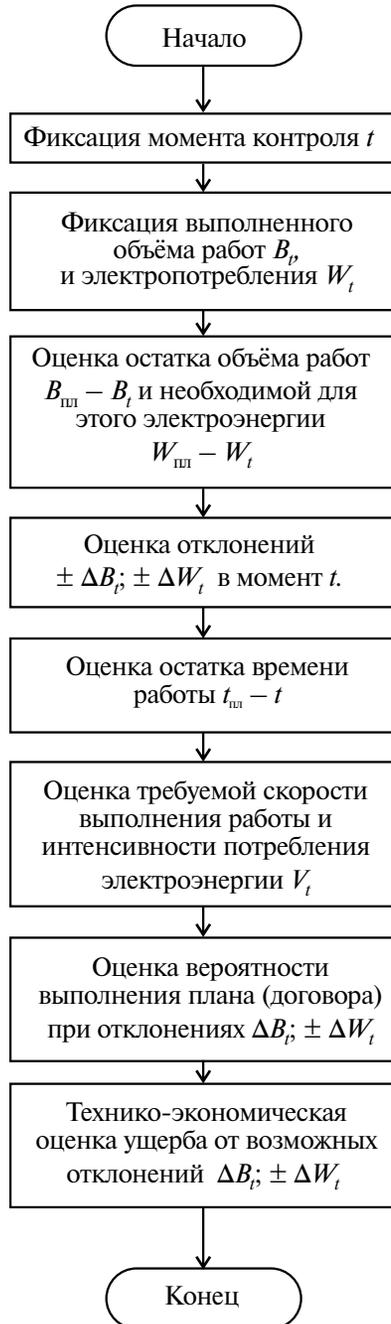


Рис. 3. Блок-схема алгоритма контроля текущего состояния технологического процесса и электропотребления.

технологическая линия, цех, предприятие. На основании полученной информации возможно принятие решений об управлении электропотреблением, изменении скорости выпуска продукции, ввода дополнительных резервов и перевода оборудования в другой режим работы. Принятые решения должны находить отражение в системе контроля в качестве новых исходных данных.

### УЧЕТ ВОЗМОЖНЫХ КОЛЕБАНИЙ ОБЩЕСИСТЕМНОГО ПАРАМЕТРА

Увеличение частоты контроля параметров режима (напряжение, ток, мощность, частота) позволяет обеспечить оперативное управление электропотреблением. Это требуется, так как возможны значительные отклонения режимов электропотребления от запланированных (математическое ожидание случайного процесса), приводящие к увеличению вероятности выхода параметров режима за допустимые пределы. Если при контрольном замере в момент времени  $t_1$  зафиксировано значение электропотребления  $W_1$  с отклонением на  $\Delta W_1$ , то требуется оценка вероятности выхода электропотребления за допустимые пределы в последующие временные интервалы. Следовательно, необходим переход к задаче прогнозирования выбросов случайного процесса [25]. Необходимость использования характеристик выбросов случайного процесса обусловлена тем, что работа сложных производственных систем и их СЭС осуществляется в предельных режимах.

Требования по безопасности, надежности и эффективности должны обеспечиваться во всех режимах электропотребления, включая максимальный и минимальный, а также во всех допустимых технологических режимах [26]. Это важно, так как требуется обеспечить функционирование технологического процесса в предельных режимах (критические и экстремальные состояния) посредством анализа вероятностной структуры случайных процессов. График возможных колебаний системного параметра приведен на рис. 4.

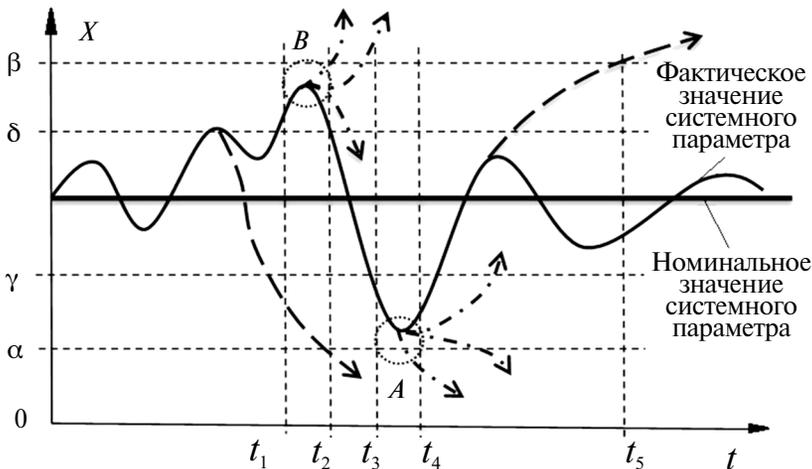


Рис. 4. График возможных колебаний системного параметра.

Область допустимого изменения системного параметра  $X$ , соответствующего значениям электропотребления, токов, напряжений, частоты определяется интервалом  $\{\alpha, \beta\}$ . Пока его значение не выходит за пределы  $\alpha < X < \beta$ , то сложная производственная система сохраняет интегративное свойство, включающее целостность (единство взаимосвязей и взаимодействия элементов) и эмерджентность (несводимость свойств системы к свойствам отдельных элементов). При выходе  $X$  за пределы интервала  $\{\alpha, \beta\}$  невозможно обеспечить поддержание динамического равновесия в сложной производственной системе за счет скоординированного управления. При этом сложная производственная система утрачивает свою интегративность и по определению при  $t > t_5$  перестает функционировать из-за срабатывания электрических или технологических защит, предотвращающих ее повреждение.

Частные компоненты параметра  $X$  могут принимать значения  $\{\gamma > \alpha, \delta < \beta\}$ , что определяет область частичного гомеостаза  $\{\gamma < X < \delta\}$ . При  $\{\gamma < X < \alpha\}$  или  $\{\delta < X < \beta\}$  сложная производственная система обычно переходит в новое качественное состояние, но продолжает функционировать как единый объект. Это происходит в диапазонах времен  $\{t_1, t_2\}$  и  $\{t_3, t_4\}$ . Приближение системного параметра к предельно допустимым значениям (области  $A$  и  $B$ , рис. 4) может привести к системному кризису, когда дальнейшая работа сложной производственной системы может быть нарушена. При переходе сложной производственной системы в зону бифуркации ее состояние становится непредсказуемым.

## УСЛОВИЯ, УТОЧНЯЮЩИЕ РЕЖИМЫ И ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

Фактическое значение электропотребления  $W$  (системный параметр) является одной из реализаций случайной функции  $\xi(t)$ . В большинстве задач, аналогичных тем, которые приведены на рис. 1, 2 можно считать, что при фиксированном значении  $t_{пл}$  и колебаниях мгновенных значений электропотребления  $w(t)$  пропорционально колеблется и потребляемая мощность  $p(t)$ , то есть  $w(t) \propto p(t)$ . Так как любая случайная функция определяется семейством выборочных реализаций на некотором интервале времени  $t \in [t_0, t_0 + T]$ , при допущении стационарности и эргодичности случайной функции, то возможно рассмотреть лишь одну выборочную функцию  $\xi(t)$  непрерывного случайного процесса.

График выборочной реализации случайной функции  $\xi(t)$  и характеристики выбросов ее траектории при пересечении критического уровня  $W_{кр\ max} \propto P_{кр\ max}$  приведен на рис. 5, где:  $\tau_0$  – время первого достижения заданной границы;  $\xi_{mm}$  – амплитуда абсолютного максимума;  $\xi_m$  – амплитуда локальных максимумов;  $n(t)$  – число пересечений случайной функцией уровня  $W_{кр\ max}$ ;  $n_{ext}(t)$  – число максимумов и минимумов случайной функции  $\xi(t)$ ;  $\tau^+(W)$ ,  $\tau^-(W)$  – длительности выбросов случайной функции  $\xi(t)$  на уровне  $W_{кр\ max}$  [25].

Для описания поведения и введения числовых характеристик случайной функции выделяется совокупность «особых» точек. При критическом уровне электропотребления  $W_{кр\ max}$  реализация случайной функции  $\xi(t) = w(t)$  характеризуется положительными  $n^+(W_{кр\ max}, T)$ , отрицательными  $n^-(W_{кр\ max}, T)$  и общими  $n(W_{кр})$ ,

$T = n^+(W_{\text{кр max}}, T) + n^-(W_{\text{кр max}}, T)$  пересечениями его на интервале  $t \in [t_0, t_0 + T]$  (рис. 5).

Величины  $\tau^+(W) = \tau_{+}(W)$  и  $\tau^-(W) = \tau_{-}(W)$  – это длительности положительных и отрицательных выбросов между положительными (+) и отрицательными (-) пересечениями критического уровня  $W_{\text{кр max}}$ . В момент времени  $t = t_1$  траектория  $\xi(t)$  впервые выходит за предел  $W_{\text{кр max}}$ , а время его достижения –  $\tau_0$ . Функция  $\xi(t)$  на интервале  $T < \infty$  имеет конечное число максимумов  $n_{\text{max}}(T)$  и минимумов  $n_{\text{min}}(T)$  с различными амплитудами  $\xi_m$ . В момент времени  $t_m$  траектория  $\xi(t)$  достигает абсолютного максимума  $\xi_{\text{mm}}$ . Такой подход позволяет описать траекторию  $\xi(t)$  определенным числом ее экстремальных амплитуд с указанием длительности интервалов между отдельными экстремумами. Это требуется для создания системы автоматического управления электропотреблением.

Очевидно, что возможен (рис. 5) анализ характеристик случайной функции  $\xi(t)$  на основе последовательности особых точек траектории  $\xi(t)$ , представляющих случайную последовательность выбросов (максимумов). Множество точек  $t_i^+$  и  $t_i^-$ , случайно распределенных на осях  $A$  и  $B$  времени  $t$ , образуют поток случайных событий. Тогда вероятность отсутствия события  $t_i$  эквивалентна вероятности того, что случайная величина  $\xi_i$  не превысит порогового значения  $W_{\text{кр max}}$ :

$$p^- = P(\xi_i < W_{\text{кр max}}) = F_{\xi}(W_{\text{кр max}}) = 1 - p^+, \tag{12}$$

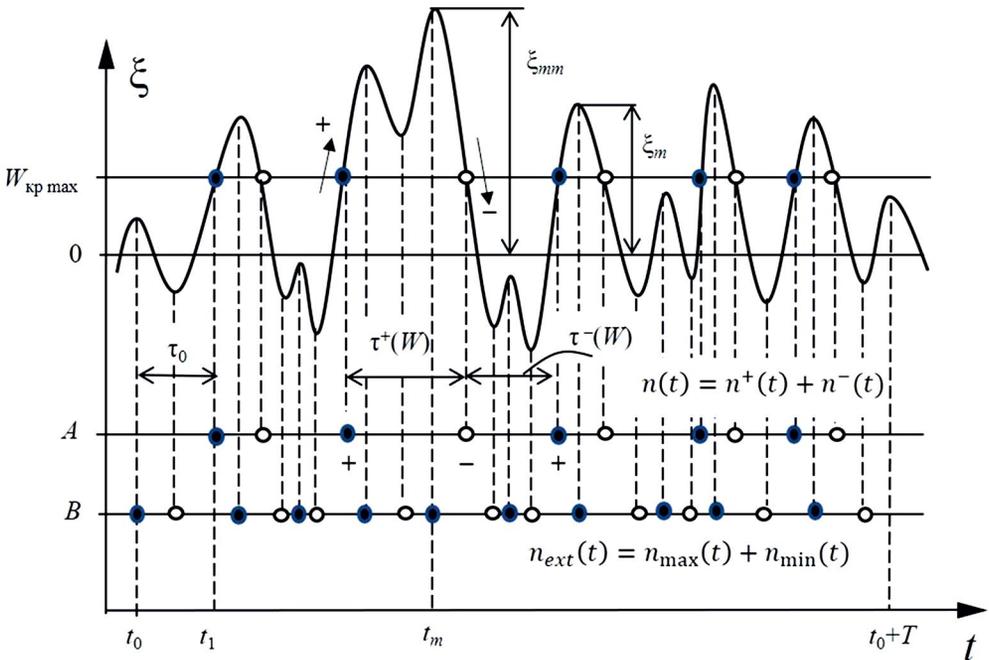


Рис. 5. График выборочной реализации случайной функции и характеристики выбросов ее траектории

Таким образом, значения выборочной функции  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$  случайной последовательности  $\{\xi_n, n = \overline{1, n}\}$  отражают вероятности появления  $p^+$  и отсутствия  $p^- = 1 - p^+$  отдельного события для моментов времени  $t_1, t_2, \dots, t_n$  превышения критического уровня  $W_{\text{кр max}}$ . Такой подход согласуется с классической схемой Бернулли [23, 27], когда случайная величина  $n^+(W_{\text{кр max}})$  описывается биномиальным распределением:

$$p_k(n^+) = P\{n^+(W_{\text{кр max}}, n) = k\} = C_n^k (p^+)^k (p^-)^{n-k}, k = 0, 1, 2, \dots, n, \quad (13)$$

где  $C_n^k = n!/k!(n-k)!$  – число сочетаний из  $n$  элементов по  $k$ .

Распределением (13) оценивается вероятность  $P\{n^+(W_{\text{кр max}}, n) = k\}$  того, что в последовательности из  $n$  независимых наблюдений для моментов времени  $t_1, t_2, \dots, t_n$  и, соответственно, значений случайной функции  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$  произойдет ровно  $k$  превышений порогового уровня  $W_{\text{кр max}}$ . Определение математического ожидания и дисперсии числа возможных превышений уровня  $W_{\text{кр max}}$  производится простейшим образом по известным из теории вероятностей общим формулам (14) [23, 27]:

$$\begin{aligned} N^+(W_{\text{кр max}}, n) &= M\{n^+(W_{\text{кр max}}, n)\} = np^+; \\ D[n^+(W_{\text{кр max}}, n)] &= np^+(1 - p^+). \end{aligned} \quad (14)$$

Опыт эксплуатации сложных производственных систем показывает, что возможно существование нескольких возрастающих ступеней критических уровней  $W_{\text{кр max}}$ . Каждый из этих уровней в случайные моменты времени  $t_i$  может пересекаться выборочной функцией  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ . Последовательность пересечений рассматривается как отдельная реализация  $t_1, t_2, \dots, t_n$  случайного точечного процесса  $\{t_i(W_j)\}$  превышений уровня  $W_j$  [25]. График технологического процесса для двух критических уровней электропотребления  $W_2 > W_1$  соответствует границам  $\{\gamma < X < \alpha\}$  или  $\{\delta < X < \beta\}$  (рис. 4) и приведен на рис. 6.

Так как величины  $\xi_j$  независимы, то выполняются условия схемы Бернулли, при которых число превышений  $n^+(W_j, n)$  уровня  $W_j$  описывается биномиальным распределением, аналогично формуле (13). Математическое ожидание и дисперсия числа возможных превышений уровня  $W_j$  вычисляются по формуле (14).

В соответствии с рис. 6 точечный случайный процесс  $t_i(W_2)$  на уровне  $W_2$  есть результат «прореживания» потока  $t_i(W_1)$  с уровня  $W_1$ . Следовательно, вероятности

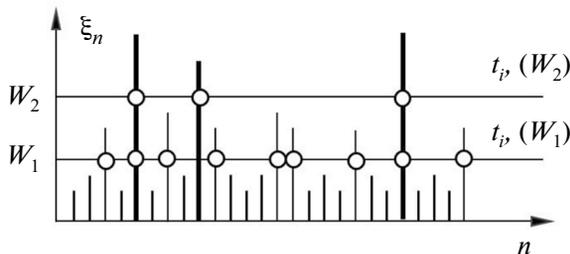


Рис. 6. График технологического процесса с превышением двух критических уровней электропотребления.

математического ожидания и дисперсии числа возможных превышений уровня  $p^+(W_j)$  будут уменьшаться. Их разность является информацией о вероятности нахождения значений исследуемой случайной последовательности  $\xi_n$  в диапазоне уровней  $\xi \in (W_1, W_2)$ :

$$P\{\xi \in (W_1, W_2)\} = p^+(W_2) - p^+(W_1), \quad (15)$$

что на рис. 4 представлено границами  $\{\gamma < X < \alpha\}$  или  $\{\delta < X < \beta\}$ .

Управление сложной производственной системой сводится к изменению сроков выполнения плана (задания) по выпуску продукции, перераспределению ресурсов или изменению потребляемой мощности и электропотребления. Сложность объекта управления, возможность изменения структуры и связей, номенклатуры выпускаемой продукции, а также случайные внешние и внутренние факторы существенно усложняют процесс принятия решений по управлению электропотреблением.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поиск баланса между обеспечением надежности и эффективности в сложных производственных системах посредством выбора оптимальных технологических режимов требует повышения эффективности управления электропотреблением, в том числе за счет создания автоматизированных систем управления электропотреблением.

Сложные производственные системы часто функционируют в предельных электрических и технологических режимах, а также в условиях воздействия случайных внутренних и внешних факторов. При этом требования по безопасности, надежности и эффективности должны обеспечиваться. Необходимо дальнейшее развитие и применение уточненных методов анализа вероятностной структуры в системе контроля состояния сложной производственной систем для повышения достоверности прогнозирования количества и величины отклонений электропотребления и их последствий.

Обоснована необходимость дальнейшего исследования вероятностной структуры случайной функции, так как характеристики выбросов обладают физической наглядностью, достаточно просто измеряются, и во многих задачах позволяют одновременно с измерениями выполнять переход от аналоговой к цифровой форме представления информации.

Анализ особенностей траекторий случайных процессов функционирования сложных производственных систем и их режимов электропотребления позволяет выполнять оценки основных числовых характеристик биномиального распределения при различных значениях критических уровней. При этом становится возможной оценка относительных длительностей нахождения реализаций случайной функции в критических областях, вероятности выхода траекторий за границы области допустимых значений и других характеристик.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Есяков С.Я., Луин К.А., Стенников В.А., Воронай Н.И., Редько И.Я., Баринов В.А. Трансформация электроэнергетических систем // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. № 4. С. 134–141.

2. *Тягунов М.Г.* Цифровая трансформация и энергетика // Энергетическая политика. 2021. № 9. С. 74–85.
3. *Воропай Н.И.* Направления и проблемы трансформации электроэнергетических систем // Электричество. 2020. № 7. С. 12–21.
4. *Цуриков Г.Н., Щербатов И.А.* Применение промышленного интернета вещей на объектах энергетики // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2018. № 2. С. 97–100.
5. *Массель Л.В.* Современный этап развития искусственного интеллекта (ИИ) и применение методов и систем ИИ в энергетике // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 4. С. 5–20.
6. *Иващенко В.А.* Теоретико-методологические основы, методы и математические модели управления электропотреблением промышленных предприятий // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2005. № 2. С. 100–114.
7. *Соляник А.И.* Современное состояние научной методологии формирования инвестиционной и ценовой политики электроэнергетики // Экономика и предпринимательство. 2016. № 12. С. 963–966.
8. *Воропай Н.И., Ефимов Д.Н., Решетов В.И.* Анализ механизма развития системных аварий в электроэнергетических системах // Электричество. 2008. № 10. С. 12–24.
9. *Колосок И.Н., Коркина Е.С.* Анализ кибербезопасности цифровой подстанции с позиций киберфизической системы // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 3. С. 121–131.
10. *Резчиков А.Ф.* Структуры автоматизированных систем управления энергетикой промышленных предприятий. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1983, ч. 1 – 120 с., ч. 2 – 164 с.
11. *Илюшин П.В.* Интеграция электростанций на основе возобновляемых источников энергии в единой энергетической системе России: обзор проблемных вопросов и подходов к их решению // Вестник МЭИ. 2022. № 4. С. 98–107.
12. *Бык Ф.Л., Илюшин П.В., Мышкина Л.С.* Особенности и перспективы развития распределенной энергетики в России // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2021. Т. 64. № 6. С. 78–87.
13. *Kulikov A.L., Shepvalova O.V., Ilyushin P.V., Filippov S.P., Chirkov S.V.* Control of electric power quality indicators in distribution networks comprising a high share of solar photovoltaic and wind power stations // Energy Reports. 2022. Т. 8. № 9. Pp. 1501–1514.
14. *Куликов А.Л., Илюшин П.В., Севостьянов А.А.* Применение статистического выборочного контроля при мониторинге показателей качества электрической энергии в современных системах электроснабжения // Электротехника. 2022. № 4. С. 46–53.
15. *Воропай Н.И., Стенников В.А., Барахтенко Е.А.* Интегрированные энергетические системы: вызовы, тенденции, идеология // Проблемы прогнозирования. 2017. № 5. С. 39–49.
16. *Гвоздев Д.Б., Болонов В.О., Окнин Е.П., Здирук К.Б., Кузьминов И.М.* О возможности применения цифровых двойников в управлении объектами электроэнергетики // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. № 6. С. 30–35.
17. *Илюшин П.В.* Особенности противоаварийного управления при аварийных дефицитах мощности в автономных энергосистемах // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2016. № 5. С. 2–11.
18. *Папков Б.В., Куликов А.Л.* Теория систем и системный анализ для электроэнергетиков. – М.: Издательство Юрайт, 2016. – 470 с.

19. *Воропай Н.И.* Надежность систем электроснабжения. Изд. 2-е, перераб. и доп. — Новосибирск: Наука, 2015. — 208 с.
20. *Папков Б.В., Осокин В.Л.* Управление электропотреблением в интеллектуальных системах электроснабжения. — Старый Оскол: ТНТ, 2023. — 440 с.
21. *Папков Б.В., Осокин В.Л.* Вероятностные и статистические методы оценки надежности элементов и систем электроэнергетики: теория, примеры, задачи. — Старый Оскол: ТНТ, 2017. — 424 с.
22. *Свиридов В.В.* Контроль в сложных системах. — М.: Знание, 1978. — 64 с.
23. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. — М.: Высш. шк., 1999. — 576 с.
24. *Эдельман В.И.* Надежность технических систем: экономическая оценка. — М.: Экономика, 1988. — 151 с.
25. *Хименко В.И.* Выбросы случайных процессов и проблема пересечения уровней. — М.: ТЕХНОСФЕРА. 2022. — 582 с.
26. *Илюшин П.В.* Выбор управляющих воздействий противоаварийной автоматики в распределительных сетях для повышения надежности электроснабжения потребителей // Релейная защита и автоматизация. 2013. № 3. С. 74–81.
27. *Гнеденко Б.В.* Курс теории вероятностей. — М.: Изд-во ЛКИ/ URSS, 2015.

## **Features of Power Consumption Management in Complex Production Systems**

**B. V. Papkov<sup>1</sup>, P. V. Ilyushin<sup>2, \*</sup>, A. L. Kulikov<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Knyaginino, Russia*

<sup>2</sup>*Energy Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia*

*\*e-mail: ilyushin.pv@mail.ru*

Solving the problems of optimizing modes and power consumption management in complex production systems is closely related to the availability of sufficient and reliable information about the features of the technological process. The features of non-stationary production modes and the possibilities of power consumption management in these conditions are considered. The results of the analysis of power consumption modes are obtained on the basis of taking into account a number of random factors determined by both internal and external circumstances, provided that the production plan (task) is mandatory. The application of the theory of emissions of random processes to increase the reliability of the initial information is justified. The necessity of further investigation of the features of technological processes in complex production systems based on the probabilistic structure and random functions is substantiated. This is due to the fact that the radiation characteristics are physically visible, they are quite easy to measure, and in many tasks they allow you to make the transition from analog to digital representation of information simultaneously with measurements.

*Keywords:* complex production system, technological process, optimization of modes, power consumption management, theory of emissions of random processes, random function