



# Yirik nasos stansiyalarida energiya samaradorligini oshirishda optimal boshqaruv usullarini qo'llash

Obid Y. Nurmatov<sup>1a)</sup>, Flora M. Makhmaraimova<sup>1</sup>

<sup>1a)</sup> PhD dotsent, Toshkent davlat texnika universiteti, 100095, O'zbekiston; [obidjon444@mail.ru](mailto:obidjon444@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-6084-9282>

<sup>1</sup> ассист., Toshkent davlat texnika universiteti, 100095, O'zbekiston; [obidjon444@mail.ru](mailto:obidjon444@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-6084-9282>

**Dolzarbliq:** respublikamizda yirik nasos stansiyalarining (NS) energiya samaradorligini oshirish, ularning elektr energetika tizimlari (EET) bilan birgalikdagi rejimlarini, shuningdek, ularga bo'lgan birgalikdagi ta'sirini hisobga olgan holda tadqiq qilishni talab qiladi.

**Maqsad:** nasos stansiyalarining va elektr energetika tizimlari rejimlari bilan o'zaro ta'sirini boshqaruv nazariyasi usullari, shuningdek, boshqaruvni optimallashtirish orqali NS energiya samaradorligini oshirish usullari asosida tahlil qilish.

**Metodlar:** tizimli tahlil usullaridan foydalanildi, NS rejimlari avtomatik boshqaruvining matematik modellaridan foydalanildi. Shuningdek, NS va EETning turli ekspluatatsiya rejimidagi ishini tadqiq qilish va ularning faoliyatining optimal sharoitlarini aniqlash imkonini beruvchi matematik modellashtirish va tahlil usullaridan foydalanildi.

**Natijalar:** yirik NS va EETning birgalikdagi rejimlari samaradorligini tahlil qilish uchun avtomatik boshqaruv va optimallashtirishning matematik modellaridan foydalanish imkoniyatini tasdiqlashdan iborat. Olingan natijalar nasos stansiyalarini loyihalash, modernizatsiya qilish va ekspluatatsiya qilishda, shuningdek, ularning ish rejimlarini avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimlarini ishlab chiqishda qo'llanilishi mumkin.

**Kalit so'zlar:** EET, nasos stansiyalari, matematik modellar, avtomatik boshqaruv tizimlari, birgalikdagi rejimlari, samaradorlik va optimallashtirish.

## Повышение энергоэффективности крупных насосных станций на основе методов оптимального управления

Обид Ё. Нурматов<sup>1a)</sup>, Флора М. Махмараймова<sup>1</sup>

<sup>1a)</sup> PhD доцент, Ташкентский государственный технический университет, 100095, Узбекистан; [obidjon444@mail.ru](mailto:obidjon444@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-6084-9282>

<sup>1</sup> ассист., Ташкентский государственный технический университет, 100095, O'zbekiston; [obidjon444@mail.ru](mailto:obidjon444@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-6084-9282>

**Актуальность:** в нашей республике повышение энергоэффективности крупных насосных станций (НС) требует исследования совместных с электроэнергетической системой (ЭЭС) режимов с учетом их взаимовлияния.

**Цель:** анализ взаимного влияния режимов крупных насосных станций и электроэнергетических систем, на основе методов теории управления, а также методов повышения энергоэффективности НС за счёт оптимизации управления.

**Методы:** использовались методы системного анализа, применялись математические модели автоматического управления режимами НС. Также использовались методы математического моделирования и анализа, позволяющие исследовать работу НС и ЭЭС в различных эксплуатационных режимах и определять оптимальные условия их функционирования.

**Результаты:** заключаются в подтверждении возможности использования математических моделей управления и оптимизации для анализа эффективности совместных режимов крупных НС и ЭЭС. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании, модернизации и эксплуатации насосных станций, а также при разработке систем автоматизированного управления их режимами работы.

**Ключевые слова:** ЭЭС, насосные станции, математические модели, системы управления, совместные режимы, энергоэффективность и оптимизация.

## Improving energy efficiency of pumping stations using optimal control methods

Obid Y. Nurmatov<sup>1a)</sup>, Flora M. Makhmaraimova<sup>1</sup>

<sup>1a)</sup> PhD docent, Tashkent State Technical University, 100095, Uzbekistan; [obidjon444@mail.ru](mailto:obidjon444@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-6084-9282>

<sup>1</sup> assist., Tashkent State Technical University, 100095, Uzbekistan; [obidjon444@mail.ru](mailto:obidjon444@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-6084-9282>

**Relevance:** In our republic, increasing the energy efficiency of large pumping stations (PS) necessitates investigating their joint operating modes with the electric power system (EPS), considering the combined influence on their respective modes.

**For citation:** Nurmatov O.Y., Makhmaraimova F.M. Improving energy efficiency of pumping stations using optimal control methods. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 1, pp. 112-119. <https://doi.org/10.5281/zenodo.20001098>

Received: 2.11.2025  
Revised: 10.12.2025  
Accepted: 15.02.2026  
Published: 26.03.2026

**Copyright:** © Obid Y. Nurmatov, Flora M. Makhmaraimova, 2026. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



**Aim:** to analyze the mutual influence of large pumping station operating modes on electric power system modes, based on control theory methods, as well as methods for improving PS energy efficiency through optimized control.

**Methods:** methods of system analysis were employed, and mathematical models for automatic control of PS operating modes were applied. Mathematical modeling and analysis methods were also utilized, allowing for the investigation of PS and EPS operation under various operating conditions and the determination of optimal functioning conditions.

**Results:** the results confirm the possibility of using mathematical models for automatic control and optimization to analyze the efficiency of joint operating modes of large PS and EPS. The obtained results can be used in the design, modernization, and operation of pumping stations, as well as in the development of automated control systems for their operating modes.

**Keywords:** EPS, pumping stations, mathematical models, automatic control systems, joint operating modes, efficiency and optimization.

## 1. Введение (Introduction)

В настоящее время проблема эффективного использования энергетических ресурсов является одной из наиболее актуальных задач на глобальном уровне. Значительная доля потребления электроэнергии в промышленности, сельском хозяйстве и коммунальном хозяйстве приходится на насосные станции. Особенно важную роль играют крупные насосные станции, обеспечивающие водоснабжение, орошение и технологические процессы в различных отраслях экономики. В связи с этим повышение их энергоэффективности приобретает важное экономическое и экологическое значение [1,2].

Энергопотребление насосных станций определяется рядом факторов, среди которых ключевую роль играют техническое состояние насосного оборудования, параметры гидравлической системы, а также режимы эксплуатации. Практика показывает, что на многих действующих насосных станциях энергоресурсы используются нерационально. Это приводит к избыточным затратам электроэнергии, увеличению эксплуатационных расходов и ускоренному износу оборудования [3,4].

В последние годы особое внимание уделяется вопросам повышения энергоэффективности за счёт оптимизации и управления режимами работы насосных агрегатов. Применение современных автоматизированных систем управления, частотно-регулируемых приводов, а также средств цифрового мониторинга, позволяет осуществлять контроль и регулирование работы насосов в реальном времени. Это способствует снижению энергопотребления, повышению общей эффективности системы и увеличению срока службы оборудования [5].

Кроме того, анализ графиков нагрузки насосных станций, оптимизация параметров расхода и давления воды открывают дополнительные возможности для энергосбережения. Повышение энергоэффективности требует не только внедрения технических решений, но и разработки эффективных стратегий управления с последующей их практической реализацией.

В данной статье рассматриваются вопросы повышения энергоэффективности крупных насосных станций за счёт управления режимами их работы. В частности, анализируются существующие проблемы, предлагаются пути снижения энергопотребления, рассматриваются современные методы управления и оценивается их практическая эффективность. Результаты исследования могут быть использованы при модернизации насосных станций и оптимизации их эксплуатации [6].

## 2. Методы и материалы (Methods and materials)

С тех пор, как в 1960 году П.Э. Калман заложил основы современной теории управления, некоторые известные исследователи предложили её в исследованиях энергосистем. Поскольку энергетическая система представляет собой сложную нелинейную многомерную систему, существует множество ограничений на анализ системы с помощью классической линейной теории одномерного управления. Современная линейная многомерная теория управления, основанная на методе описания в пространстве состояний, может более легко устранить эти ограничения [7,8].

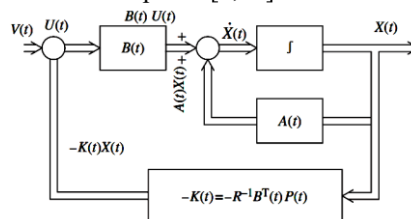
Теория оптимального управления - это развитая и все более широко применяемая ключевая ветвь современной теории управления. Её цель - определить оптимальный закон управления, который сделает работу системы оптимальной при определенных условиях. Уравнение состояния системы, не зависящее от времени, в общем случае может быть выражено как:

$$\dot{X} = AX + BU, \quad (1)$$

где  $X$  -  $n$ -мерный вектор состояния;  $U$  -  $r$ -мерный вектор управления состоянием;  $A$  - матрица коэффициентов состояния;  $B$  - матрица коэффициентов управления.

Собственные значения уравнения состояния системы определяются матрицей  $A$ . Чтобы из-

менить ее характеристики, можно ввести обратную связь вектора состояния, чтобы сформировать замкнутую систему, как показано на рис.1 [9,10].



**Рис. 1.** Структурная схема замкнутой системы обратной связи  
**Fig. 1.** Structural diagram of a closed feedback system

Вектор состояния системы обратной связи:

$$U = V - KX; \quad (2)$$

где  $K$  - матрица усиления обратной связи по состоянию.

Если уравнение (2) подставить в уравнение. (1) получается следующее выражение:

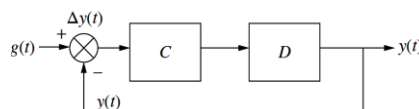
$$\dot{X} = AX + B(V - KX) = (A - BK)X + BV. \quad (3)$$

На этом этапе собственные значения замкнутой системы будут определяться матрицей  $A - BK$ . Следовательно, оптимальный закон управления состоит в том, чтобы выбрать значение  $K$  и сделать работу исследуемой системы оптимальной при заданном законе управления при определенных условиях [11,12].

### 3. Результаты (Results)

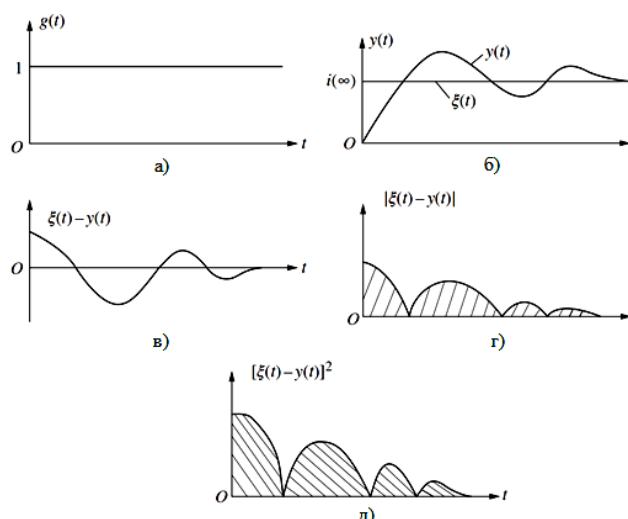
Показатели эффективности системы обычно определяются исходя из реальных требований проекта. Разные показатели эффективности приводят к разным законам регулирования [13].

Система управления SISO, показанная на рис.2, взята в качестве примера. Когда шаговая переходная функция введена в систему, показанную на рис.3, результат будет таким, как показано на рис.3,б.



**Рис. 2.** Система управления SISO

**Fig. 2.** SISO control system



**Рис. 3.** Реакция на ошибку под действием функции единичного шага: а) вход единичного шага, б) идеальный динамический отклик и фактический динамический отклик, в) отклик на ошибку, г) абсолютное значение отклика на ошибку, д) квадратичная ошибка

**Fig. 3.** Error response under the action of the unit step function: a) unit step input, b) ideal dynamic response and actual dynamic response, c) error response, d) absolute value of the error response, e) squared error

Предполагается, что  $y(t)$  - это фактическая реакция системы, а  $\xi(t)$  - ожидаемая динамическая реакция. Оптимальные показатели эффективности управления минимизируют отклонение



$y(t) - \xi(t)$ . Есть три распространенные формы показателей эффективности, представленные математическими выражениями:

$$J = \xi(t) - y(t) = J_{\min} \quad (4)$$

$$J = \int_0^{\infty} [\xi(t) - y(t)] dt = J_{\min} \quad (5)$$

$$J = \int_0^{\infty} [\xi(t) - y(t)]^2 dt = J_{\min} \quad (6)$$

На рисунках 3, в – д показаны графики значения отклонения  $y(t) - \xi(t)$ , интегрального значения отклонения и квадратичного интегрального значения отклонения [14,15].

Уравнение (5) показывает, что определенный интеграл абсолютного значения отклонения фактического отклика  $[y(t)]$  от ожидаемого отклика  $\xi(t)$  минимален.  $J$  - это общая функция, которая изменяется вместе с функцией  $[y(t)]$ . Уравнение (6) показывает, что ожидаемое значение для определенного интегрального значения  $[\xi(t) - y(t)]^2$  минимально.

Поскольку результатом уравнения (6) является определенный интеграл от квадрата отклонения в интервале времени  $0 \sim \infty$ , который называется квадратичным показателем эффективности. Для многомерной системы указанная выше концепция также может использоваться для определения ее показателей эффективности. Если фактический вектор состояния выражается как  $X(t)$ , а ожидаемый вектор состояния выражается как  $\hat{X}(t)$ , квадратичный индекс производительности, требующий минимального отклонения вектора состояния, равен:

$$J = \int_0^{\infty} [\hat{X}(t) - X(t)]^T [\hat{X}(t) - X(t)] dt = J_{\min} \quad (7)$$

Однако, когда вышеупомянутый критерий оптимальной эффективности управления соблюдается, этого может быть трудно достичь из-за необходимости в чрезмерно управляемой переменной. Следовательно, вектор управления  $U(t)$  также ограничен. Это выражается как:

$$J = \int_0^{\infty} \{ [\hat{X}(t) - X(t)]^T Q [\hat{X}(t) - X(t)] + U^T(t) R U(t) \} dt = J_{\min} \quad (8)$$

где  $Q, R$  - весовые матрицы, соответствующие состоянию системы и вектору управления соответственно [17,18].

Чтобы облегчить анализ, баланс системы управления часто помещается в начало пространства состояний. Когда система не устойчива, вектор состояния отклоняется от исходного. Если система асимптотически устойчива, вектор состояния в конечном итоге будет стремиться к началу координат. В таких условиях ожидаемый вектор состояния - это просто начало координат, то есть  $\hat{X}(t)=0$ . В этот момент уравнение (3.10) можно переписать как:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [X^T(t) Q X(t) + U^T(t) R U(t)] dt = J_{\min} \quad (9)$$

Уравнение (8) - это квадратичный показатель эффективности оптимального управления линейной системой [19,20].

Чтобы улучшить статическую и динамическую устойчивость генераторов в условиях малых возмущений, ранее применялась линейная многомерная теория оптимального управления к управлению системами возбуждения [21].

Целью разработки линейной оптимальной системы управления является определение оптимального вектора управления во всех возможных векторах управления.

Управляемая линейная инвариантная во времени система выражается как:

$$\dot{X} = AX + BU, \quad (10)$$

где  $X$  -  $n$ -мерный вектор состояния;  $U$  -  $r$ -мерный вектор управления состоянием;  $A, B$  - постоянные матрицы размера  $n \times n$  и  $n \times r$ , соответственно.

Если оптимальная система управления спроектирована на основе квадратичного показателя эффективности, показанного в формуле (9) можно доказать, что оптимальный закон управления существует и единственен. Это выражается следующим образом:

$$U = -R^{-1} B^T P X = -KX, \quad (11)$$

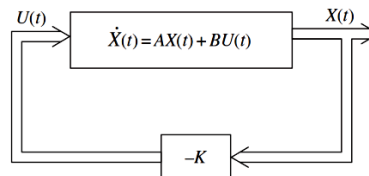
где  $P$  -  $n \times n$ -мерная симметричная постоянная матрица, которая является положительно определенным решением алгебраической матрицы Риккати [22].

Чтобы минимизировать обобщенную функцию  $J$  уравнения (9) необходимое условие должно удовлетворять алгебраическому матричному уравнению Риккати следующим образом:

$$-PA - A^T P + PBR^{-1} B^T P - Q = 0. \quad (12)$$

На рис.4 показано, что оптимальным вектором управления  $U$  является линейная отрица-

тельная обратная связь вектора состояния  $X$ .



**Рис.4.** Структурная схема линейной оптимальной системы управления

**Fig. 4.** Structural diagram of a linear optimal control system

Как видно из вышеизложенного, оптимальное управление означает минимальное отклонение процесса управления, минимальное время, необходимое для достижения ожидаемого конечного значения, оптимальное конечное значение и минимальную энергию управления при определенных конкретных условиях [18,21].

По сравнению с классической теорией управления, теория оптимального управления имеет следующие характеристики [22]:

1. Классическая теория управления синтезирует в основном в сложной частотной области, тогда как современная теория оптимального управления синтезирует непосредственно во временной области и в то же время лучше уравнивает динамические качества и устойчивость.
2. Классическая теория управления использует концепцию передаточной функции в сложной частотной области и применяет ее к системам SISO, тогда как теория оптимального управления использует метод анализа пространства состояний во временной области и применяет его к многомерным системам, а также к моделированию и расчету на ЭВМ.
3. Классическая теория управления применима только к системам, не зависящим от времени, тогда как теория оптимального управления может быть распространена на системы, зависящие от времени.

#### 4. Обсуждение (Discussion)

Переходные процессы в системах электропривода насосных станций по своей природе относятся к сложным динамическим явлениям, обусловленным взаимосвязанным протеканием электрических, механических и гидравлических процессов. Характер протекания этих процессов определяется большим числом факторов, включая параметры насосного агрегата, характеристики электродвигателя, свойства трубопроводной сети, а также режимы работы электроэнергетической системы. Учет совокупного влияния этих факторов представляет значительную сложность и требует применения методов математического моделирования и системного анализа [21].

Особое значение при совместном исследовании электро- и гидромеханических процессов имеет корректное представление элементов электроэнергетической системы, включая нагрузки, системы возбуждения, линии электропередачи и другие компоненты. Поскольку крупные электроэнергетические системы характеризуются высокой степенью сложности и разнообразием элементов, параметры и состояния которых в каждый момент времени известны с ограниченной точностью, при их анализе используются приближенные модели. В ряде случаев отдельные элементы системы могут рассматриваться в статической постановке, что упрощает расчеты, но требует обоснования допустимости таких допущений.

Таким образом, исследование процессов в системах насосных станций с учетом их взаимодействия с электроэнергетической системой является важной научно-технической задачей, направленной на повышение энергоэффективности, надежности и устойчивости функционирования энергосистемы в целом.

#### 5. Заключение (Conclusion)

В данной работе на основе теории управления исследовано взаимовлияние крупных насосных станций (НС) и электроэнергетических систем (ЭЭС) на режимы их работы, а также затронуты вопросы повышения энергоэффективности НС на основе методов оптимального управления.

Проведенный анализ показал, что насосные станции представляют собой сложные многомерные динамические системы, для эффективного управления которыми классические методы оказываются недостаточными. Применение методов управления в пространстве состояний и теории оптимального управления позволяет более полно учитывать динамические характеристики системы НС-ЭЭС, и обеспечивает возможность их эффективного регулирования.



Установлено, что использование обратной связи по вектору состояния и синтез оптимального закона управления на основе квадратичного критерия качества способствует повышению устойчивости системы и оптимизации энергопотребления насосных агрегатов.

Таким образом, применение методов оптимального управления в системах крупных насосных станций является эффективным направлением повышения их энергоэффективности и надёжности. Полученные результаты могут быть использованы при модернизации насосных станций, разработке автоматизированных систем управления и совершенствовании режимов работы электроэнергетических систем.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Закон Республики Узбекистан «О внесении изменений и дополнений в Закон Республики Узбекистан «О рациональном использовании энергии»», 14.07. 2020, № ЗРУ-628.
2. Указ Президента РУз № УП-6079 от 05.10.2020 «Об утверждении стратегии "Цифровой Узбекистан-2030" и мерах по её эффективной реализации».
3. Постановление Президента Республики Узбекистан от 22 августа 2019 г. № ПП-4422 «Об ускоренных мерах по повышению энергоэффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии».
4. Аллаев К.Р. Современная энергетика и перспективы её развития /под ред. Салимова А.У. – Т.: Fan va texnologiyalar nashriyot-manbaa uyi, 2021. – 952 с.
5. Гамм А.З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем. -М.: Наука, 1986, -220 с.
6. Тащилин В.А. Анализ и выбор параметров стабилизации устройств регулирования возбуждения с использованием методов идентификации: Автореф. дис. канд. тех. наук. –Е.: 2018. <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01009789829>.
7. Абрамович Б.Н., Круглый А.А. Возбуждение, регулирование и устойчивость синхронных двигателей. - Л. : Энергоатомиздат : Ленингр. отд-ние, 1983. - 128 с.
8. Allayev, K.R., Makhmudov, T.: Analysis of small oscillations of complex electrical systems. E3S Web Conf. 216, 01097 (2020).
9. Jing Shi, Ying Xu, Meng Liao, Shuqiang Guo, Yuanyuan Li, Li Ren, Rongyu Su, Shujian Li, Xiao Zhou, Yuejin Tang Integrated design method for superconducting magnetic energy storage considering the high frequency pulse width modulation pulse voltage on magnet Applied Energy, Volume 248, 2019, pp. 1-17.
10. Allayev K.R., Nurmatov O., Makhmudov T. Influence of automatic excitation regulators on modes of hydropower plants//6th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin’s Readings”, ERZR 2021. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85115186020&origin=resultslist#metrics> .
11. Makhmudov T., Nurmatov O. Modernization of automatic excitation control systems of generators in Syrdarya TPP//6th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin’s Readings”, ERZR 2021. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85115188474&origin=resultslist> .
12. Allaev K., Makhmudov T.: Research of small oscillations of electrical power systems using the technology of embedding systems. Electrical Engineering 102(1), 309–319 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00202-019-00876-9> .
13. Felipe M. Pimenta, Arcilan T. Assireu Simulating reservoir storage for a wind-hydro hybrid system Renewable Energy, Volume 76, 2015, pp. 757-767 .
14. Allayev K. Nurmatov O., Makhmaraimova Calculation experimental studies of transition processes in electricity systems with account of hydroenergy installations. Journal of Critical Reviews ISSN- 2394-5125 VOL 7, ISSUE 13, 2020 [http:// www.jcreview.com/index.php?iid=2020-7-13.000&&jid=197&lng=](http://www.jcreview.com/index.php?iid=2020-7-13.000&&jid=197&lng=) .
15. JuanI. Pérez Díaz, M. Chazarra, J. García González, G. Cavazzini, A. Stoppato Trends and challenges in the operation of pumped-storage hydropower plants Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 44, 2015, pp. 767-784.
16. Nurmatov O., Makhmudov T.: Pulatov N. Control of the excitation system of synchronous motors pumping stations //AIP Conference Proceedings, 3152, 040008 (2024) <https://doi.org/10.1063/5.0218781>.
17. Nurmatov O., Nosirov F., Shamsutdinov K., Obidjonova D. Research on control systems for automatic excitation regulation utilizing fuzzy logic methodology. AIP Conference Proceedings AIP Conf. Proc. 3331, 040081 (2025) <https://doi.org/10.1063/5.0306119>.



18. Urishev B., Nosirov F., Nurmatov O., Amirov Sh., Urishova D. Local energy system based on thermal, photovoltaic, hydroelectric stations and energy storage system AIP Conf. Proc. 3331, 070015 (2025) <https://doi.org/10.1063/5.0306446>.

19. Makhmudov T.: Nurmatov O., Ramatov A.N., Site Selection for Solar Photovoltaic Power Plants Using GIS and Remote Sensing Techniques /AIP Conference Proceedings, 3152, 060002 (2024) <https://doi.org/10.1063/5.0218779>.

20. Nurmatov O., Makhmudov T.: Pulatov N. Control of the excitation system of synchronous motors pumping stations /AIP Conference Proceedings, 3152, 040008 (2024) <https://doi.org/10.1063/5.0218781>.

21. Rismukhamedov D., Shamsutdinov K., Magdiev K., Peysenov M., Nurmatov O. Construction of pole-switchable windings for two-speed motors of mechanisms with a stress operating mode /AIP Conference Proceedings AIP Conf. Proc. 3331, 040059 (2025) <https://doi.org/10.1063/5.0305963>.

22. Wejia Yang, Jiandong Yang, Wei Zeng, Renbo Tang, Liangyu Hou, Anting Ma, Zhigao Zhao, Yumin Peng Experimental investigation of theoretical stability regions for ultra-low frequency oscillations of hydropower generating systems Energy, Volume 186, 2019, Article 1158

## REFERENCES

1. Law of the Republic of Uzbekistan "On Amendments and Additions to the Law of the Republic of Uzbekistan "On Rational Use of Energy", July 14, 2020, No. ZRU-628 (In Russ.).

2. Decree of the President of the Republic of Uzbekistan No. UP-6079 dated October 5, 2020 "On Approval of the Digital Uzbekistan -2030 Strategy and Measures for its Effective Implementation" (In Russ.).

3. Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan dated August 22, 2019 No. PP-4422 "On Accelerated Measures to Improve Energy Efficiency of Economic Sectors and the Social Sphere, the Introduction of Energy-Saving Technologies and the Development of Renewable Energy Sources" (In Russ.).

4. Allaev K.R. Modern energy and prospects for its development / ed. Salimova A.U. – T.: Fan va texnologiyalar nashriyot-manbaa uyi, 2021. – 952 p. (In Russ.).

5. Allaev K.R., Khoxlov V.A., Sitdikov R.A., Transient processes of pumping stations/Pod red. prof. M.M. Muxammadiev. - «Fan va texnologiya». –T. 2012, 226 s.

6. Tashilin V.A. Analysis and selection of stabilization parameters of excitation control devices using identification methods: Avtoref. dis. kan. tex. nauk. – Ye.: 2018. – 24 s.

7. Abramovich B.N., Kruglyy A.A. Excitation, regulation and stability of synchronous motors. - L. : Energoatomizdat : Leningr. otd-nie, 1983. - 128 s.

8. Allaev K., Makhmudov T.: Analysis of small oscillations of complex electrical systems. Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2020), vol. 216, pp. 1–4. E3s Web of Conferences (2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601097>.

9. Jing Shi, Ying Xu, Meng Liao, Shuqiang Guo, Yuanyuan Li, Li Ren, Rongyu Su, Shujian Li, Xiao Zhou, Yuejin Tang Integrated design method for superconducting magnetic energy storage considering the high frequency pulse width modulation pulse voltage on magnet Applied Energy, Volume 248, 2019, pp. 1-17.

10. Allayev K.R., Nurmatov O., Makhmudov T. Influence of automatic excitation regulators on modes of hydropower plants//6th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin’s Readings”, ERZR 2021. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85115186020&origin=resultslist#metrics> .

11. Makhmudov T., Nurmatov O. Modernization of automatic excitation control systems of generators in Syrdarya TPP//6th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin’s Readings”, ERZR 2021. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85115188474&origin=resultslist> .

12. Allaev K., Makhmudov T.: Research of small oscillations of electrical power systems using the technology of embedding systems. Electrical Engineering 102(1), 309–319 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00202-019-00876-9> .

13. Felipe M. Pimenta, Arcilan T. Assireu Simulating reservoir storage for a wind-hydro hybrid system Renewable Energy, Volume 76, 2015, pp. 757-767 .

14. Allayev K. Nurmatov O., Makhmaraimova Calculation experimental studies of transition processes in electricity systems with account of hydroenergy installations. Journal of Critical Reviews ISSN- 2394-5125 VOL 7, ISSUE 13, 2020 [http:// www.jcreview.com/index.php?iid=2020-7-13.000&&jid=197&lng=](http://www.jcreview.com/index.php?iid=2020-7-13.000&&jid=197&lng=) .



15. JuanI. Pérez Díaz, M. Chazarra, J. García González, G. Cavazzini, A. Stoppato Trends and challenges in the operation of pumped-storage hydropower plants *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 44, 2015, pp. 767-784.
16. Nurmatov O., Makhmudov T.: Pulatov N. Control of the excitation system of synchronous motors pumping stations //AIP Conference Proceedings, 3152, 040008 (2024) <https://doi.org/10.1063/5.0218781>.
17. Nurmatov O., Nosirov F., Shamsutdinov K., Obidjonova D. Research on control systems for automatic excitation regulation utilizing fuzzy logic methodology. *AIP Conference Proceedings AIP Conf. Proc.* 3331, 040081 (2025) <https://doi.org/10.1063/5.0306119>.
18. Urishev B., Nosirov F., Nurmatov O., Amirov Sh., Urishova D. Local energy system based on thermal, photovoltaic, hydroelectric stations and energy storage system *AIP Conf. Proc.* 3331, 070015 (2025) <https://doi.org/10.1063/5.0306446>.
19. Makhmudov T.: Nurmatov O., Ramatov A.N., Site Selection for Solar Photovoltaic Power Plants Using GIS and Remote Sensing Techniques//AIP Conference Proceedings, 3152, 060002 (2024) <https://doi.org/10.1063/5.0218779>.
20. Nurmatov O., Makhmudov T.: Pulatov N. Control of the excitation system of synchronous motors pumping stations ///AIP Conference Proceedings, 3152, 040008 (2024) <https://doi.org/10.1063/5.0218781>.
21. Rismukhamedov D., Shamsutdinov K., Magdiev K., Peysenov M., Nurmatov O. Construction of pole-switchable windings for two-speed motors of mechanisms with a stress operating mode *AIP Conference Proceedings AIP Conf. Proc.* 3331, 040059 (2025) <https://doi.org/10.1063/5.0305963>.
22. Wejia Yang, Jiandong Yang, Wei Zeng, Renbo Tang, Liangyu Hou, Anting Ma, Zhigao Zhao, Yumin Peng Experimental investigation of theoretical stability regions for ultra-low frequency oscillations of hydropower generating systems *Energy*, Volume 186, 2019, Article 1158.