

## ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫЙ ПРЕОБРА ЗОВАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

*Норбоев Отажон Нормунович*

*Каршинский инженерно-экономический институт*

**Аннотация:** Импульс кенглиги модулятори доимий такрорлаш тезлиги билан модуляцияланган импульсларни ҳосил қилади. Импульс кенглиги модуляторини чиқишидаги импульсларнинг давомийлиги кириш сигналининг даражаси билан аниқланади. Ушбу мақолада импульс кенгли модуляторини ишлаш принциплари, схемалари ва параметрлари ҳисобланган.

**Аннотация:** Широотно-импульсный модулятор генерирует модулированные импульсы с постоянной частотой повторения. Длительность импульсов на выходе ШИМ определяется уровнем входного сигнала. В данной статье рассчитаны принципы, схемы и параметры ШИМ.

**Annotation:** The pulse width modulator generates modulated pulses with a constant repetition rate. The duration of the pulses at the PWM output is determined by the level of the input signal. In this article, the principles, circuits and parameters of PWM are calculated.

Электропривод-энергосиловое устройство, приводящее в движение машину или механизм. Включает в себя источник энергии, передаточный механизм и аппаратуру управления. Современный этап развития привода характеризуется массовым переходом от нерегулируемого электропривода к регулируемому. Развитие и совершенствование современных систем электроприводов идет по пути внедрения статических полупроводниковых преобразовательных устройств. Одними из которых является широтно-импульсный преобразователь постоянного напряжения (ШИП). Применение полупроводниковых приборов позволяет создать импульсные преобразовательные устройства с высокой частотой и разнообразными законами коммутации силовой цепи, обладающие высокими энергетическими показателями, малыми габаритами и весом, практической безынерционностью и хорошей перегрузочной способностью. По точности и диапазону регулирования импульсные системы электропривода “полупроводниковый ШИП-двигатель постоянного тока”, не уступает лучшим системам непрерывного регулирования, а по экономичности, весогабаритным и динамическим показателям намного превосходит их.

Перспективы применения полупроводниковых Шип в различных областях техники чрезвычайно широки. Транзисторные ШИП весьма эффективно используется как стабилизаторы и регуляторы напряжения приборных

комплексов и для создания быстродействующих позиционных и тахометрических следящих систем на постоянном токе.

На рисунке 1.1 приведена блок-схема широтно-импульсного преобразователя для электропривода постоянного тока. Преобразователь состоит из входного усилителя постоянного тока (УПТ), широтно-импульсного модулятора (ШИМ), усилителя импульсов (УИ) – одного или нескольких, импульсного усилителя мощности (ИУМ) и устройства токоограничения (УТО).

Широтно-импульсный модулятор формирует модулированные по длительности импульсы с постоянной частотой их следования. Длительность импульсов на выходе ШИМ однозначно определяется уровнем входного сигнала.

Импульсный усилитель мощности используется для широтно-импульсного регулирования напряжения на нагрузке-якоре двигателя постоянного тока. Так как цепь якоря двигателя представляет собой активную-индуктивную нагрузку с противо-ЭДС, ИУМ будет обеспечивать протекание тока от источника питания в якорь, а также от якоря в источник или во вспомогательные цепи. Оптимальная частота переключения для ШИП, работающего на якорь двигателя, выбирается из условия обеспечения минимума суммарных дополнительных потерь в цепи якоря и потерь в коммутирующих элементах ИУМ. В качестве коммутирующих элементов в ИУМ используются транзисторы.

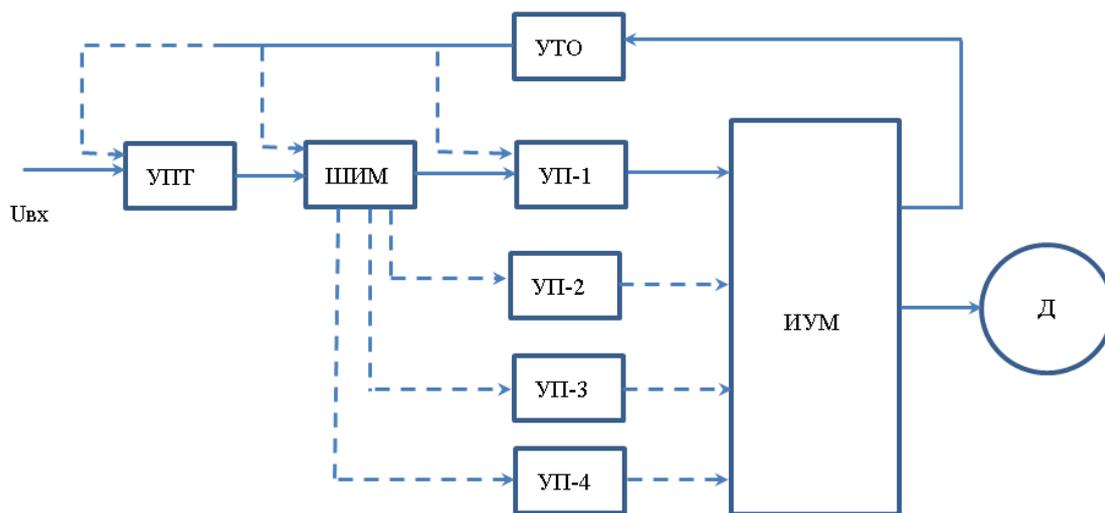


Рисунок 1-Блок схема широтно-импульсного преобразователя для постоянного тока

Устройство токоограничения обеспечивает ограничение тока якоря на заданном уровне при перегрузках в переходных режимах. Скорость изменения тока якоря достаточно высока, и, следовательно, УТО должно обладать высоким быстродействием.

Управление транзисторными ключами групп вентилях моста может быть совместным или отдельным. При совместном управлении одновременно

осуществляется управление ключами обеих групп вентилях. При раздельном управлении всегда осуществляется управление ключами только одной группы. Последовательное включения и выключения (переключения) транзисторных ключей определяется законом коммутации (переключения) вентилях. Для управления ШИП используются в основном три закона коммутации (переключения) вентилях:

- симметричный,
- несимметричный,
- поочередной,

Наиболее простым способом управления ШИП является симметричный. При симметричном способе управление в состоянии переключения находятся все четыре транзисторных ключа моста, а напряжение на выходе ШИП представляет собой знакопеременные импульсы, длительность которых регулируется входным сигналом. В ШИП с симметричным управлением среднее напряжение  $U_{\text{я}}$  на выходе ШИП равно нулю, когда относительная продолжительность включения  $\gamma_0=0,5$ . Симметричный способ управления обычно используется в маломощных приводах постоянного тока.

При несимметричном способе управления переключаются транзисторные ключи (ТК) фазной группы ТК3 и ТК4 (ключи ТК1 и ТК2 при противоположной полярности входного сигнала) рисунок 1.2, транзисторный ключ открыт постоянно и насыщен, а ключ ТК2 постоянно закрыт. Транзисторные ключи ТК3 и ТК4 переключаются в противофазе, обеспечивая протекание тока якоря от противо-ЭДС двигателя. При этом на выходе ШИП формируются знакопостоянные импульсы и среднее напряжение на выходе равно нулю, когда относительная продолжительность включения одного из нижних на рисунке 2 транзисторов  $\gamma_0=0$ .

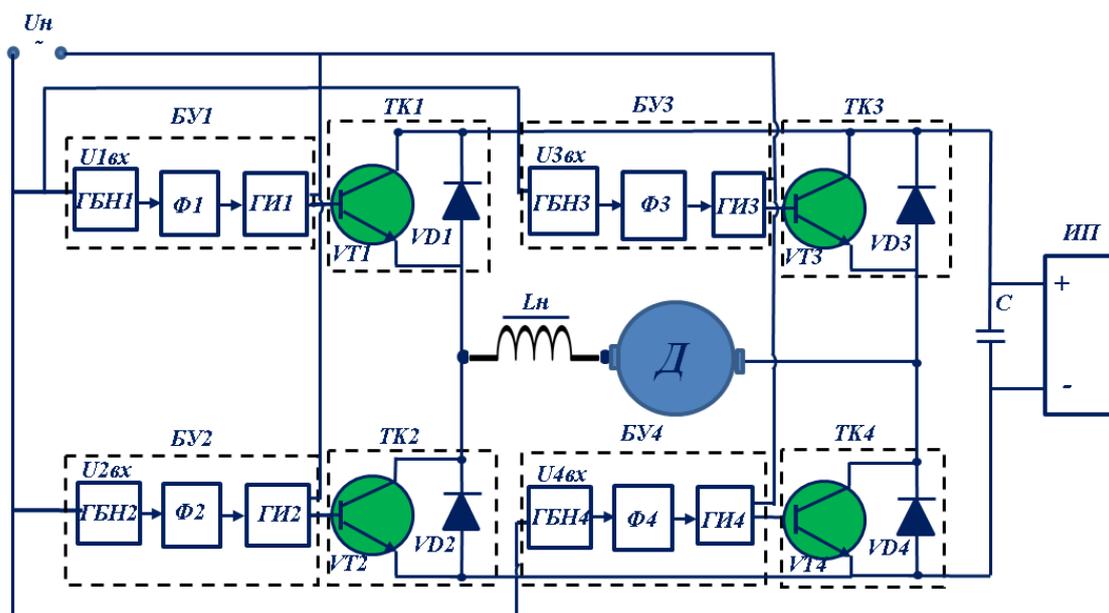


Рисунок 2. Принципиальная схема транзисторного широтно-импульсного

VT-транзистор;  
 VD-диод;  
 ГБН-Генератор базового напряжения;  
 Ф-Фазовращатель;  
 ГИ-Генератор импульсов;  
 БУ-блок управления;  
 ИП-источник питания постоянного тока;  
 $U_n$  -Переменный ток;  
 Д-двигатель.

При поочередном управлении при любом знаке входного сигнала в состоянии переключения находятся все четыре транзисторных ключа моста, однако частота переключения каждого из них в два раза меньше частоты напряжения на выходе. Управляющие напряжения транзисторных ключей одной фазы моста ТК1, ТК2 и ТК3, ТК4 постоянно находятся в противофазе; при этом ключи переключаются через период выходного напряжения  $T$ . Этим достигаются одинаковые условия работы полупроводниковых приборов в мостовой схеме.

### Расчет параметров силового преобразователя

Силовой преобразователь—это элемент, при помощи которого оказывается регулирующее воздействие на электропривод. По своему характеру такое воздействие зависит от рода тока, способа управления движением электропривода и от конкретных особенностей преобразователя. В качестве силового преобразователя принимаем широтно-импульсный преобразователь напряжения. Основным вариантом реверсивного ШИП с выходом на постоянном токе является мостовая схема на рисунке 2, выполненная на четырех транзисторных ключах ТК1-ТК4, шунтированных диодами. Каждый транзисторный ключ кроме выходных транзисторов содержит пред выходной каскад, блок защиты и управления.

Последовательность расчета:

1. Для симметричного способа управления ШИП примем относительную длительность включения равной ( $\gamma_0=0.5$ ).

2. С учетом  $U_n$  и  $I_{max}$  выбираем транзистор и диод.

Напряжение, приложенное к коммутирующему транзисторному ключу, определяется как  $U \approx 24B$  - напряжение питание электродвигателя;

Номинальный ток коллектора выбираем из условия выдерживания пускового тока  $I_K \approx I_{max} \approx 10,8 A$ .

3. По найденным значениям тока и напряжение выбираем транзистор типа BDW93C и диод типа 2Д252А со следующими паспортными данными расположенные в таблице 1.1 и таблице 1.2.

Таблица 1.1. Паспортные данные транзистора

Полярность:	NPN
Максимальная рассеиваемая мощность (P <sub>c</sub> ):	80 Вт
Максимально допустимое напряжение коллектор-база (U <sub>кб</sub> ):	100 В
Максимально допустимое напряжение коллектор-эмиттер (U <sub>кэ</sub> ):	100 В
Максимально допустимое напряжение эмиттер-база (U <sub>кб</sub> ):	5 В
Максимальный постоянный ток коллектора (I <sub>к</sub> ):	12 А
Предельная температура PN-перехода (PN):	150 °C
Граничная частота коэффициента передачи тока (ft):	20
Постоянная времени транзистора (T <sub>т</sub> ):	1 μс
Статический коэффициент передачи тока (h <sub>fe</sub> ):	15000
Корпус транзистора:	TO220

Таблица 1.2. Паспортные данные диода.

Максимально допустимое постоянное (U <sub>об</sub> ) или импульсное (U <sub>имп</sub> ) обратное напряжение на диоде:	80 В
Максимально допустимый постоянный (I <sub>пр</sub> ) или импульсный (I <sub>имп</sub> ) прямой ток через диод:	30 А
Максимальное падение напряжение на диоде (U <sub>пр</sub> ) при заданном прямом токе (I <sub>пр</sub> ) через него:	0.95 В
Обратный ток диода при предельном обратном напряжении. Приводится для температуры +25 (10(25)) и максимальной рабочей температуры (I <sub>ом</sub> ):	2 мА
Максимально допустимая температура структуры (θ <sub>рп</sub> ):	175 °C

4. В современных IGBT транзисторах частоты коммутации находится в пределах от 5000 до 15000 Гц, примем  $f_k=5000$  Гц. Тогда  $T_{шип}$  определяется как

$$T_{шип} = \frac{1}{f_k} = \frac{1}{5000} = 2 * 10^{-4} \text{ с}$$

Потери в IGBT в проводящем состоянии

$$P_{ss} = I_{cp} * U_{ce(sat)} * \left( \frac{1}{8} * \frac{D}{3\pi} \right) = 4,5 * 1,2 * \left( \frac{1}{8} * \frac{0,95}{3\pi} \right) = 1,220 \text{ Вт}$$

где  $I_{cp} = \frac{I_{max}}{k_1} = \frac{10,8}{2,4} = 4,5$  А максимальная амплитуда тока на входе;

где  $k_1 = 2,4$  – коэффициент допустимой кратковременной перегрузки по току, необходимой для обеспечения динамики ЭП;  $k_2 = 1,1-1,2$  – коэффициент допустимой мгновенной пульсации тока;

$$D = \frac{t_p}{T} \approx 0,95 \text{ -максимальная скважность;}$$

$U_{ce(sat)}^n = 1,2 \text{ В}$  прямое падение напряжения на IGBT в насыщенном

$I_{cp}$  и  $T_j = 125 \text{ }^\circ\text{C}$  (типовое значение  $U_{ce(sat)} \square 0,95\text{--}1,5 \text{ В}$ ).

Потери IGBT при коммутации

$$P_{sw} = \frac{1}{\pi\sqrt{2}} * \frac{I_{cp} * U_{cc} * (t_{c.on} + t_{c.off}) * f_k}{2} =$$

$$= \frac{1}{\pi\sqrt{2}} * \frac{4,5 * 32,4 * (0,4 + 0,7 * 10^{-6} * 5000)}{2} = 0,09 \text{ Вт}$$

где  $t_{c.on} \square 0,410 \cdot 10^{-6} \text{ с}$  – продолжительность переходных процессов по цепи  
 $t_{c.off} \square 0,7 * 10^{-6}$

$t_{c}$ –продолжительность переходных процессов по цепи коллектора IGBT на закрывание транзистора (типовое значение

$t_{c(on)} = 0,3\text{--}0,4 \text{ мкс}$ ;  $t_{c(off)} = 0,6\text{--}0,7 \text{ мкс}$ );

$U_{cc} \square k_{с.н} \square U_{дв.н} \square 1,35 \square U_{дв.н} \square 1,35 \square 24 \square 32,4 \text{ В}$  – напряжение на коллекторе IGBT, (коммутируемое напряжение, равное напряжению звена постоянного тока для системы ШИП);

$K_{с.н} \square 1,35$  коэффициент схемы для номинальной нагрузки;

Суммарные потери в IGBT

$$P_Q = P_{SS} + P_{Qsw} = 1,220 + 0,09 = 1,31 \text{ Вт}$$

$$P_{SS} = I_{ep} * U_{ec} * \left(\frac{1}{8} * \frac{D}{3\pi}\right) = 4,5 * 0,6 * \left(\frac{1}{8} * \frac{0,95}{3\pi}\right) = 0,609 \text{ Вт}$$

Потери обратного диода в проводящем состоянии где  $I_{ep} \approx I_{cp}$  максимальная амплитуда тока через обратный диод, А;

$U_{ec} \square 0,6 \text{ В}$  – прямое падение напряжения на диоде в проводящем состоянии

при  $I_{ep}$ , В.

Потери при восстановлении запирающих свойств обратного диода

$$P_{DR} = \frac{1}{8} * I_{ep} * U_{cc} * t_{rr} * f_k = \frac{1}{8} * 4,5 * 32,4 * 0,2 * 10^{-6} * 5000 = 0,0182 \text{ Вт}$$

где  $I_{rr}$ –амплитуда обратного тока через диод, А ( $I_{rr} \square I_{cp}$ );

$t_{rr}$  продолжительность импульса обратного тока, с (типовое значение 0,2 мкс), принимаем

$t_{rr} \approx 0,2$  мкс: Суммарные потери обратного диода

$$P_D \approx P_{DS} \approx P_{DR} \approx 0,609 \approx 0,0182 \approx 0,627 \text{ Вт.}$$

Результирующие потери IGBT с обратным диодом

$$P_T \approx P_Q \approx P_D \approx 0,609 \approx 0,627 \approx 1,236 \text{ Вт.}$$

Найденные результирующие потери являются основой для теплового расчета инвертора, в ходе которого определяются тип и геометрические размеры необходимого охладителя, а также проверяется тепловой режим работы кристаллов IGBT и обратного диода.

### Определение параметров силовой цепи

Сопротивления якорной цепи:

$$R_{яц} \approx R_{дв.гор} \approx 2,04 \text{ Ом}$$

Индуктивность якорной цепи:

$$L_{яц} \approx L_{дв} \approx 0,2 \approx L_{дв} \quad L_{яц} \approx 1,8 \times 10^{-3} \approx 0,2 \approx 1,8 \times 10^{-3} \approx 2,16 \times 10^{-3}$$

Коэффициент усиления преобразователя:

$$K_{шип} = \frac{U_{шт}}{U_{y.max}} = \frac{24}{10} = 2,4$$

передачная функция преобразователя

$$W(s) = \frac{K_{шип}}{s T_{шип} + 1} = \frac{2,4}{s * 2 * 10^{-4} + 1}$$

Электромагнитная постоянная времени якорной цепи привода:

$$T_{(яц)} = \frac{L_{яц}}{R_{яц}} = \frac{2,4 * 10^{-3}}{2,04} = 1,058 * 10^{-3} \text{ с}$$

передачная функция якорная цепи

$$W(s) = \frac{1}{s T_{яц} + 1} = \frac{1}{s * 16058 * 10^{-3} + 1}$$

### Структурная схема силового канала ЭП

Рассчитываем коэффициенты обратных связей по току ( $k_T$ ) и скорости ( $k_c$ ):

$$K_T = \frac{U_{y.max}}{\omega_{дв}} = \frac{10}{10,8} = 0,926$$

$$K_T = \frac{U_{y.max}}{\omega_{дв}} = \frac{10}{10,8} = 0,926$$

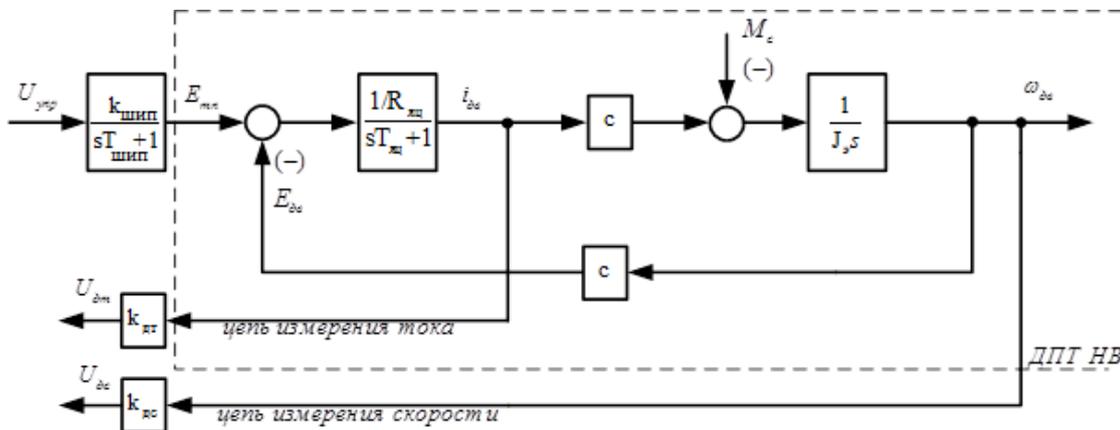


Рисунок 3– Структурная схема силовой цепи системы ШИП – ДПТ

Как видно из схемы, силовая часть включает в себя широтно-импульсный преобразователь, двигатель и цепи измерения скорости и тока.

Проверим работоспособность выбранного двигателя. Для этого собираем имитационную модель в среде Matlab Simulink (рисунок 4).

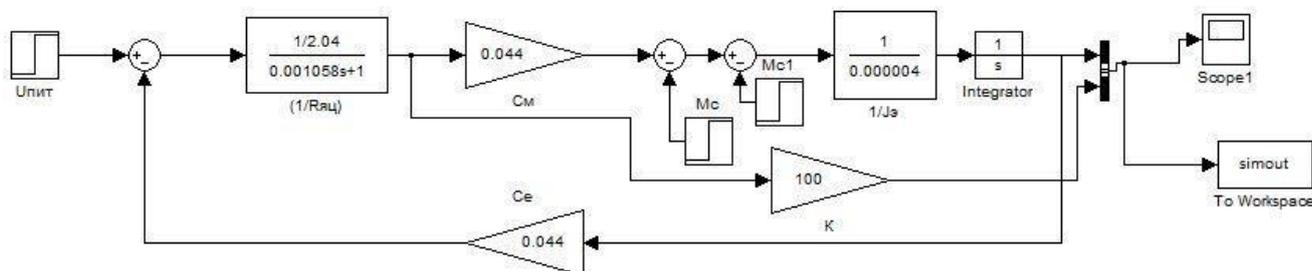


Рисунок 4 – Имитационная модель ДПТ (King Right Motor) в среде Matlab Simulink

На рисунке 1.5 показан переходный процесс по току и скорости при набросе нагрузки

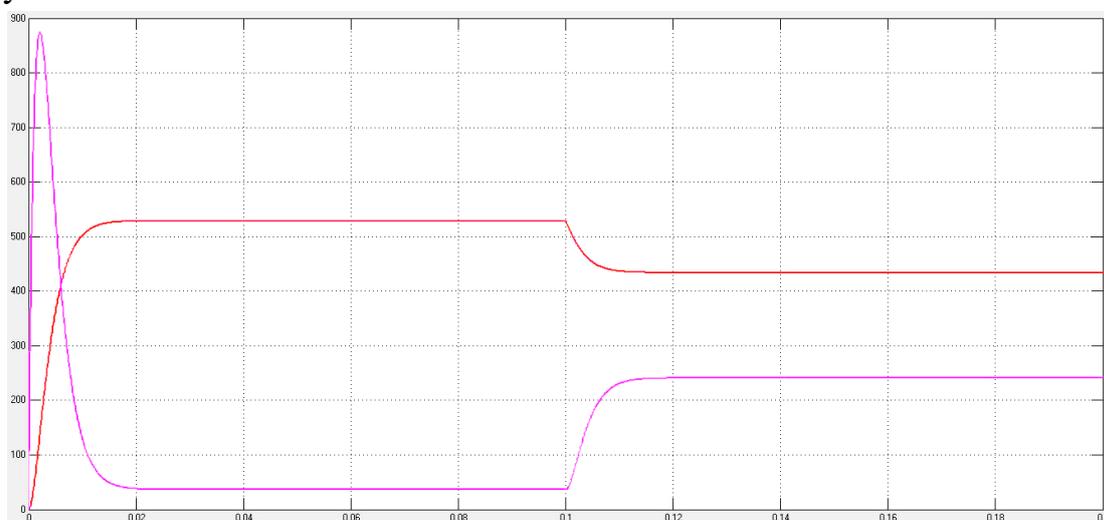


Рисунок 1.5 – Переходный процесс по току при пуске и набросе нагрузки

Переходные процессы в имитационной модели показывают, что выбранный двигатель и его параметры являются реальными.

### Литература

- 1.A.R.Mallayev, C.Xusanov, J.Bekqulov, O.N.Norboyev. Hidroelektr stansiyalaridagi elektromenik tizimlarinign quvvat koeffitsiyentini oshirib energiya tejamkorligiga erishish “O‘zbekgidroenergetika” ilmiy-tehnika jurnal 4-son.
- 2.O.N.Norboyev,I.Ibragimov. Hidroelektrostansiyalardan foydalanish, uning asosiy muammolari va ularni yechimida matlab dasturining simulink paketidan foydalanib GESda tasodifiy yuklamaning ortishini modellashtirish. Journal of new century innovations, 10(2), 195–206 pp..
- 3.J.Bekqulov, O.N.Norboyev, Sh.Xudayqul. Hidroelektr stansiyalarda o‘llaniladigan elektr dvigatellarning chastotasini avtomatik rostdashda obyektning modelini qurish va identifikatsiyalash. “O‘zbekgidroenergetika” ilmiy-texnika jurnali №4/dekabr.2021 13-14 bet
- 4.J.SH.Bekqulov, O.N.Norboyev, Sh.B.Xudayqulov. Hidroelektr stansiyalarida qo‘llaniladigan elektr dvigatellarning chastotasini avtomatik rostdashda obyektning modelini qurish va identifikatsiyalash “O‘zbekgidroenergetika” ilmiy-texnika jurnali, 2021.
- 6.Uljayev, E., Ubaydullaev, U. M., Narzullayev, S. N., & Norboyev, O. N. (2021). Application of expert systems for measuring the humidity of bulk materials. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*, (9), 131-137.
- 7.Ulzaev, E., Narzullaev, S. N., & Norboev, O. N. (2021, January). Substantiation of application of artificial neural networks for creation of humidity measuring devices. In *Euro-Asia Conferences* (Vol. 1, No. 1, pp. 86-91).
8. Norboev, O. N., Farxodov, S. U., Eshonqulov, M. N., & Ibragimov, B. S. (2021). Mathematical model of a high-frequency moisture meter for cotton seeds based on substitution schemes. *Web of Scientist: International Scientific Research Journal*, 2(05), 674-686.
- 9.Ulzaev, E., Narzullaev, S. N., Norboev, O. N., & Abdikhalilov, O. U. (2021, March). MOISTURE METER FOR POWDER BULK MATERIALS. In *Euro-Asia Conferences* (Vol. 3, No. 1, pp. 115-117).
- 10.Narzullayev, S. (2022). NECESSITY OF GRADUATION AND CALIBRATION OF MOISTURE METERS. *Open Access Repository*, 8(2), 5-8.