

УДК 621.314.6

DOI 10.52167/1609-1817-2024-133-4-450-458

Е.Д. Елеуқенов[✉], Е.А. Сарсенбаев
Satbayev University, Алматы, Қазақстан
Email: y.yeleukenov@stud.satbayev.university

РАСЧЕТ ВЫБОРА ИСТОЧНИКОВ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПОДСТАНЦИЙ

Аннотация. В данной работе рассмотрены проблемы расчета нагрузок постоянного тока собственных нужд (СН) распределительных устройств (РУ) в подстанциях. Описаны типовые нагрузки постоянного тока распределительных устройств. Приведен краткий обзор литературы по данной теме. Далее, приведена методология расчета выбора батарей (Ni-Cd) и источника бесперебойного питания для распределительных устройств подстанций.

Ключевые слова. Выбор батарей, расчет выбора ИБП, собственные нужды, нагрузки постоянного тока, питание оперативных цепей постоянного тока.

Введение.

В данной работе рассмотрены вопросы расчета электрических нагрузок постоянного тока контрольных цепей распределительных устройств подстанции 10/0,4 кВ промышленного предприятия для выбора батарей и зарядного устройства источника бесперебойного питания (ИБП). Методология расчета применима для распределительных устройств подстанций промышленных предприятий, в том числе горнорудной, нефтегазовой отрасли. Прежде чем определить нагрузки постоянного тока РУ подстанций, осуществляется сбор электрических нагрузок оборудования, которые данные РУ будут питать, с учетом характера этих нагрузок. Далее, выполняется распределение всех нагрузок с учетом технологического резервирования оборудования (раб/резерв): в случае если какое-либо оборудование имеет аналогичное резервное оборудование, то они питаются от разных шин распределительного устройства. Также, совместно с технологами, определяется требуемый тип управления каждого технологического оборудования: прямой пуск, плавный пуск, частотно-регулируемый привод.

На следующем этапе, разрабатывается однолинейная схема электроснабжения, логическая блок-диаграмма управления и схема релейных защит. После этого, разрабатывается схема контрольных цепей распределительных устройств, схемы межсоединений. После определения схемы контрольных цепей со всеми комплектующими основного и вспомогательного оборудования внутри РУ, осуществляется сбор нагрузок собственных нужд (СН) распределительных устройств (РУ). К нагрузкам СН РУ относится оборудование, находящееся внутри РУ: реле, индикаторные лампы, устройства коммутации и управления, устройства плавного пуска, частотно-регулируемого привода, блоки питания и т.п.

СН РУ разделяются на цепи постоянного и переменного тока, а также по напряжению на цепи 220 и 24В (при наличии).

Одним из важных компонентов системы защиты, управления и контроля является система бесперебойного питания постоянным током. Отказ источника питания постоянного тока может привести к тому, что устройства обнаружения неисправностей не смогут обнаружить неисправности, автоматические выключатели не сработают во время аварийной ситуации, выйдет из строя местная и дистанционная индикация и т. д. Система

бесперебойного питания постоянным током состоит из аккумулятора, зарядного устройства аккумулятора, систем распределения, коммутационные и защитные устройства, а также любое управляющее оборудование [2].

Следовательно, требуются правильная конструкция и техническое обслуживание компонентов системы бесперебойного питания оперативных цепей постоянного тока.

Материалы и методы.

Имеющиеся работы направлены на систему батарей постоянного тока определенной технологии, что затрудняет сравнение различных типов аккумуляторных батарей на предмет их общей пригодности для применения на подстанциях. Кроме того, необходима проработка расчетов батарей с учетом конкретных требований к окружающей среде и с учетом рабочего цикла электрической подстанции. В работе [2] представлен общий обзор вопросов, которые следует учитывать при проектировании системы бесперебойного питания для оперативных цепей постоянного тока для электрической подстанции [2].

В работе [3] приведен обзор расчета выбора батарей, зависимости end-of-discharge voltage от емкости ячейки батареи. Также пояснена причина необходимости наличия большего количества отрицательно заряженных пластин в батареях: $N+1$ – количество отрицательно заряженных пластин; N – количество положительно заряженных пластин. Рассмотрен оптимальный выбор количества ячеек батарей, упомянута важность оценки токов КЗ в системах ИБП постоянного тока [3].

Для определения рабочего цикла работы батарей и, в последующем, емкости, необходимо учитывать следующие данные [4]:

- количество нагрузок, значения мощности нагрузок.
- продолжительность нагрузки.
- последовательность нагрузок, в случае если нагрузки разнятся по требуемому времени резерва.
- минимальное напряжение постоянного тока нагрузок при достижении батареями точки конечного (предельного) разряда.
- минимальная температура, при котором осуществляется эксплуатация батареи, содержащего электролит.

Согласно [1, 4] нагрузки подразделяются на следующие типы:

- 1) Постоянные нагрузки.
- 2) Непостоянные нагрузки.
- 3) Мгновенные нагрузки.

Данная работа отражает дизайн батарей ИБП постоянного тока и зарядного устройства. С точки зрения эксплуатации оборудования, в работе [5,8] предложена модель анализа дерева отказов (fault-tree analysis). Однако, данная работа ориентирована на ИБП переменного тока с и без системы обхода ИБП.

В исследовании [6] рассмотрена зависимость продолжительности работы ИБП от различных параметров схем; приведен анализ хронологических изменений рабочего цикла работы ИБП на основе совокупности параметров (ток, напряжение, мощность, запас энергии). Также предложен метод оценки энергоэффективности и разработки модели прогнозирования на основе исходных параметров [6].

Работа [7] посвящена системе управления батареями. Приведена функциональная блок-диаграмма системы управления батареями, ключевые характеристики. К ключевым характеристикам относятся: мониторинг ячеек/элементов батарей, оценка параметров состояния, управления зарядом/разрядом, температурный мониторинг, диагностика неисправностей и управление состоянием [7]. Также, приведены модели эквивалентных

схем целочисленного порядка и дробного порядка с описанием преимуществ и недостатков каждой модели.

Согласно рекомендациям [8], при системе двух параллельных секций батарей, важно правильно выбрать кабель между батареей и нагрузкой: нужно учесть случай с отключением одной из секций, при котором вся нагрузка будет ориентирована на одну батарею. Т.е. необходимо учесть падение напряжения при переключении нагрузки на одну из секций батарей. Пример расчета выбора кабелей приведен в разделе 7.5.2 [8].

В работе [9] рассматривается модель определения состояния заряда никель-кадмиевых батарей. Описано экспериментальное исследование, подтверждающее применимость обобщенного уравнения Пейкерта для оценки разряда никель-кадмиевых батарей [9,10,11,12]. Также утверждается, что классическое уравнение Пейкерта неприменимо при значениях малых токов разряда батарей [9].

Результаты.

В работе выполнен расчет батарей по методологии, описанной в IEEE Std. 1115-2014, IEEE Recommended Practice for Sizing Nickel-Cadmium Batteries for Stationary Applications [1].

Таблица 1 – Сводные нагрузки 220VDC распределительных устройств

Наименование	Постоянная нагрузка 220VDC, Вт	Мгновенная нагрузка 220VDC, Вт
ЩСУ НН №1	844	777
ЩСУ НН №2	824	567
ЩСУ НН №3	806	1527
ЩСУ НН №4	873	567
ЩСУ НН №5	1015	567
ЩСУ НН №6	940	567
ЩСУ НН №7	1265	945
ЩСУ НН №8	1313	1103
РУ - 10кВ	2500	6200
Рсумм, Вт	10380	12820
Ток, А	47	58

Примечания:

1) 8-часовая непрерывная нагрузка (Вт) – нагрузки, требующие 8 часов резервного питания в аварийном режиме.

Непостоянные нагрузки (Вт) – нагрузки, на которые подается питание только в течение части рабочего цикла.

Расчетные непрерывные нагрузки используются для расчета зарядного устройства ИБП.

2) Продолжительность мгновенных нагрузок принята равной 1 минуте согласно рекомендациям IEEE 1115.

3) Мгновенные нагрузки включены в расчете батареи в начале и в конце рабочего цикла.

Расчет выполнен для никель-кадмиевых (Ni-Cd) батарей. Данные по нагрузкам приняты из таблицы 1 для типовой подстанции промышленного предприятия.

Емкость аккумулятора рассчитывается как необходимая энергия (кВт·ч), которую необходимо обеспечить в качестве резервного питания. Общая энергия будет разделена на 2х50%, а расположение аккумуляторов будет определено в А·ч - емкости для требуемого рабочего напряжения.

Далее, будет осуществлен расчет Зарядного устройства на полную выходную нагрузку постоянного тока, а также с учетом одновременной зарядки обеих батарей.

Принята следующая продолжительность зарядки: 8 часов для достижения 80% емкости аккумулятора и 12 часов для 100% емкости.

При расчете номинальных значений зарядного устройства необходимо учитывать эффективность преобразования переменного/постоянного тока; принимается допущение 0,8.

В результате необходимо рассчитать потребляемую мощность зарядного устройства при 380 В переменного тока.

Таблица 2 – Данные по токам нагрузок 220VDC

Режим нагрузки	Ток, А
Load #1 (мгновенн. нагр.)	105,5
Load #2 (пост. нагр.)	47,2
Load #3 (мгновенн. нагр.)	105,5

Принятые параметры для расчета:

Температура окруж. среды (в подстанции)	20°C
Коэфф. запаса	1.0
Коэффициент старения	1.2

Таблица 2 – Уровни напряжений

Номинальное напряжение системы	220VDC
Минимальное напряжение системы	198VDC
Максимальное напряжение системы	242VDC
Макс. напряжение системы батарей	253VDC

Таблица 3 – Профиль нагрузок

№ периода	Режим нагрузки	Ток, А	Продолжительность периода, мин.
1	Авар. режим, A1=нагрузка#1+нагрузка#2	105.5	1
2	Авар. режим, A2=нагрузка#2	47.2	478
3	Авар. режим, A3=нагрузка#2+нагрузка#3	105.5	1

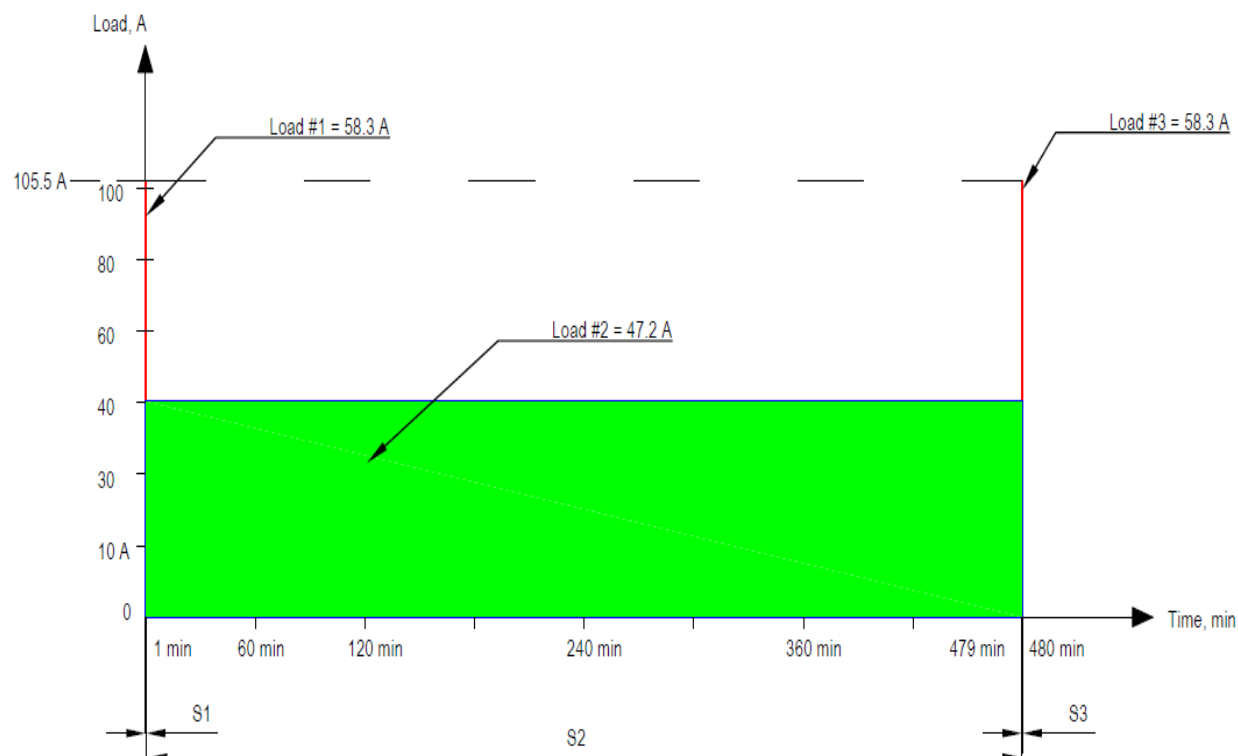


Рисунок 1 – График рабочего цикла батарей

Таблица 4 – Расчетная таблица нагрузок для выбора батарей

1	2	3	4	5	6	7	8
№ периода	I, A	Delta I, A	Продолж. периода, (t, мин)	Конец периода, мин	Коэфф. Kt	Темп. фактор	Требуемая емкость, A·ч
1,0	105,5	105,5	1,0	480,0	8,2864	1,0	873,9
2,0	47,18	-58,3	478,0	479,0	8,2699	1,0	-481,9
3,0	105,5	58,3	1,0	1,0	0,9215	1,0	53,7
Итого:							445,65

Обсуждение.

- согласно расчету, требуемая емкость батарей $C=445.65 \text{ A}\cdot\text{ч}$;
- с учетом допущенного 20% коэффициента старения: $445.65 \times 1.2 = 534.78$.

Коэффициент запаса учтен в нагрузках постоянного тока;

- нагрузки равномерно распределены между двумя секциями батарей, две секции батарей будут находиться в параллельной работе, т.е. $2 \times 50\%$. Выполненный расчет включает две секции батарей. Следовательно, для каждой секции батарей требуется $534,78/2= 267,39 \text{ A}\cdot\text{ч}$.

В качестве Ni-Cd батарей принят производитель батарей ALCAD.

Емкость батарей должна быть больше или равна требуемой емкости с учетом коэффициентов запаса и старения. Согласно каталожным данным ALCAD, выбран ближайший по емкости тип батарей $270 \text{ A}\cdot\text{ч}$. Напряжение ускоренного заряда одного

элемента (ячейки) выбранной батареи составляет 1,4375В. При максимальном напряжении системы батарей 253В, требуемое количество ячеек составляет 176шт. В случае обеспечения предельно допустимого напряжения системы 198В при 176шт. ячеек, конечное напряжения разряда батарей должно быть не менее $198В/176_{яч}=1.125 [В]$.

Примечания: Кt фактор - коэффициент разряда, зависящий от характеристик ячейки (элемента батареи). $Kt=Ном. Емкость [А \cdot ч]/Ток[А]$. В данном расчете, Кt фактор был уточнен у производителя батарей.

Расчет выбора Выпрямителя/Зарядного устройства.

Каждая секция батарей имеет соответствующее зарядное устройство (выпрямитель). В данном расчете, выбор зарядного устройства (далее – ЗУ) осуществляется с учетом одновременного заряда двух секций батарей. Т.е. в случае выхода из строя одного из зарядных устройств, две батареи заряжаются через одно ЗУ. Соответственно, при выборе ЗУ, учитывается ток нагрузки (с учетом коэффициента запаса 20%, k), ток заряда батарей, умноженный на два. Ток заряда батарей принимается с учетом 10-часового заряда, т.е. $270А \cdot ч/10ч=27А$.

Для расчета ЗУ батарей, применима следующая формула:

$$I_{ch} = 2 * I_b + k * I_L, \quad (1)$$

где I_{ch} – Ток ЗУ, I_b – ток заряда батареи, I_L – ток нагрузки.

Таким образом, находится ток ЗУ:

$$I_{ch} = 2 * 27А + 1,2 * 47,2А = 101,2А.$$

Выбирается ЗУ с номинальным током 125А.

Типовая блок-диаграмма ИБП постоянного тока приведена на рисунке 2.

Мощность зарядного устройства ИБП постоянного тока:

$$P_{UPS} = I_{ch} * U_{batt.max} * pf, \quad (2)$$

где I_{ch} – ток зарядного устройства, $U_{batt.max}$ – макс. напряжение батареи, pf – коэффициент мощности.

$$P_{UPS} = 125А * 253В * 1 = 31,63кВт.$$

Входная мощность зарядного устройства/выпрямителя с учетом КПД:

$$P_{input @ UPS} = P_{UPS}/efficiency, \quad (3)$$

где $P_{input @ UPS}$ – входная мощность зарядного устройства (ЗУ),

P_{UPS} – мощность зарядного устройства (ЗУ),

$efficiency$ – коэффициент полезного действия ЗУ.

$$P_{input @ UPS} = 31,63кВА/0,935 = 33,8кВт$$

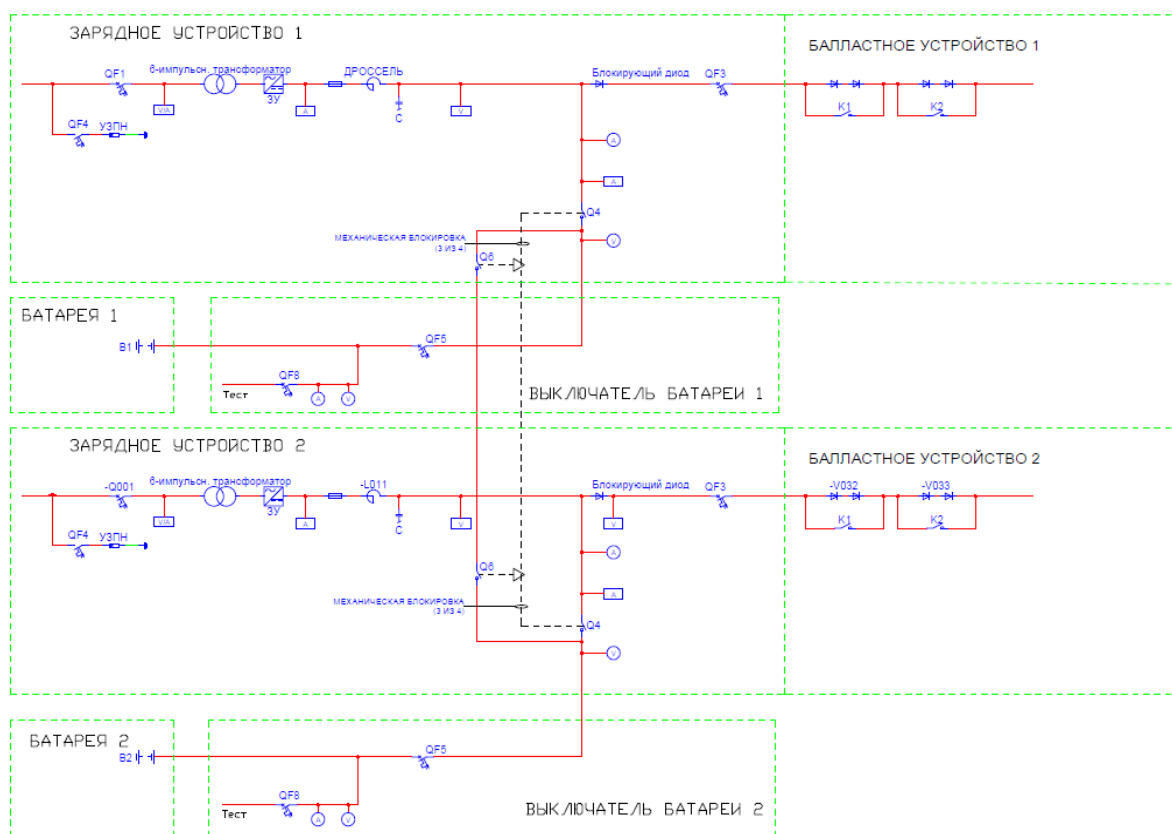


Рисунок 2 – Блок-диаграмма системы ИБП постоянного тока с составляющими элементами (адаптирована из типовой однолинейной схемы производителя ИБП - GUTOR)

Заклучение.

В работе выполнено следующее:

- 1) Приведен сбор эл. нагрузок постоянного тока типовой подстанции. Нагрузки разделены на постоянные и мгновенные.
- 2) С учетом разделения нагрузок, осуществлен расчет батарей для цепей постоянного тока распределительных устройств подстанции. Выбран тип батарей емкостью $270\text{A} \cdot \text{ч}$ с количеством элементов 176шт.
- 3) Выполнен расчет выбора зарядного устройства ИБП с учетом тока заряда батарей и нагрузки.

Учитывая отсутствие принятой методологии расчета нагрузок пост. тока распределительных устройств, в следующих работах рекомендуется разработать математическую модель потребления оперативных цепей постоянного тока в распред. устройствах. Затем составить методологию расчета нагрузок оперативных цепей пост. тока распределительных устройств с учетом коэффициентов одновременности и использования.

Также в качестве дальнейшего исследования, рекомендуется рассмотреть систему управления батареями (battery management system), включая удаленный мониторинг с комплексным решением проблем кибербезопасности.

С точки зрения эксплуатации, также немаловажен аспект анализа надежности ИБП постоянного тока. К примеру, составление модели дерева отказов (fault-tree analysis) для систем ИБП пост. тока.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] IEEE Std 1115-2014. IEEE Recommended Practice for Sizing Nickel-Cadmium Batteries for Stationary Applications.
- [2] Thompson, Michael J. (56158992700); Wilson, David. Auxiliary DC control power system design for substations (2007). 60th Annual Conference for Protective Relay Engineers, art. no. 4201117, pp. 522 – 533. DOI: 10.1109/CPRE.2007.359922
- [3] M. W. Migliarci, "Considerations for Selecting and Sizing Batteries," 1985 Annual Meeting Industry Applications Society, Toronto, ON, Canada, 1985, pp. 345-353.
- [4] IEEE Std 946-2020. IEEE Recommended Practice for the Design of DC Power Systems for Stationary Applications.
- [5] Rahmat, M.K. and Jovanovic, S. (2009), Reliability modelling of uninterruptible power supply systems using fault tree analysis method. Euro. Trans. Electr. Power, 19: 258-273. <https://doi.org/10.1002/etep.211>
- [6] Neelamraju, P.M., Yellampalli, S. Analysis of uninterruptible power supply critical-to-quality factors. J. Power Electron. 23, 1919–1930 (2023). <https://doi.org/10.1007/s43236-023-00674-4>
- [7] Yujie Wang, Jiaqiang Tian, Zhendong Sun, Li Wang, Ruilong Xu, Mince Li, Zonghai Chen,
A comprehensive review of battery modeling and state estimation approaches for advanced battery management systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 131, 2020, 110015, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110015>.
- [8] "IEEE Guide for Batteries for Uninterruptible Power Supply Systems," in IEEE Std 1184-2006 (Revision of IEEE 1184-1994), vol., no., pp.0_1-63, 2006, doi: 10.1109/IEEESTD.2006.246245.
- [9] Yazvinskaya, Natalia & Galushkin, Nikolay & Galushkin, Dmitriy & Kalmykov, Boris. (2020). Analysis and Comparison of Generalized Peukert's Equations Parameters for Nickel-Cadmium Batteries with Pocket and Sintered Electrodes. International Journal of Electrochemical Science. 15. 412-423. 10.20964/2020.01.18.
- [10] N. E. Galushkin, N. N. Yazvinskaya and D. N. Galushkin, Int. J. Electrochem. Sci. Sci., 9 (2014)
- [11] N. E. Galushkin, N. N. Yazvinskaya, D. N. Galushkin and I. A. Galushkina, Int. J. Electrochem. Sci.Sci., 9 (2014)
- [12] N. N. Yazvinsk aya, N. E. Galushkin and D. N. Galushkin, Int. J. Electrochem. Sci. Sci., 138602.

Ернар Елеуқенов, докторант, Satbayev University, Алматы, Қазақстан, y.yeleukenov@stud.satbayev.university

Ерлан Сарсенбаев, PhD, қауымдастырылған профессор, Satbayev University, Алматы, Қазақстан, y.sarsenbayev@satbayev.university

ҚОСАЛҚЫ СТАНЦИЯЛАРДЫҢ ТАРАТУ ҚҰРЫЛҒЫЛАРЫНЫҢ ҮЗДІКСІЗ ТҰРАҚТЫ ТОК КӨЗДЕРІН ТАҢДАУДЫ ЕСЕПТЕУ

Аңдатпа. Бұл жұмыста қосалқы стансалардағы тарату құрылғыларының қосалқы қажеттіліктері үшін тұрақты ток жүктемелерін есептеу мәселелері қарастырылады. Тарату құрылғыларының тұрақты жүктемелері сипатталған. Осы тақырып бойынша әдебиеттерге қысқаша шолу беріледі. Әрі қарай, қосалқы стансалардың тарату құрылғылары үшін батареяларды және үздіксіз қоректендіруді таңдауды есептеу әдістемесі келтірілген.

Түйінді сөздер. Аккумуляторларды таңдау, ИБП таңдауын есептеу, меншікті қажеттіліктер, тұрақты ток жүктемелері, тұрақты токтың жұмыс тізбектерін қоректендіру.

Yernar Yeleukenov, doctoral student, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, y.yeleukenov@stud.satbayev.university.

Yerlan Sarsenbayev, PhD, associate professor, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, y.sarsenbayev@satbayev.university

DC UPS SIZING CALCULATION FOR SUBSTATION SWITCHGEARS

Abstract. This paper examines the problems of calculating direct current (DC) loads for auxiliaries of switchgears in substations. Typical DC loads of switchgears are described. A brief literature review on this topic is provided. Next, a methodology for calculating the selection of batteries (Ni-Cd) and an uninterruptible power supply for substation switchgear is described.

Keywords. Selection of batteries, calculation of UPS selection, auxiliaries, DC loads, power supply of DC control circuits.

Получено: 24 февраль 2024 г.; принято: 02 май 2024 г.